

**The Duality of Sound.**

Eine medienwissenschaftliche Zeitkritik des sonischen Signalwesens.

**The Duality of Sound.**

A Media Scientific Critique of the Temporality of Sonic Signals.

**Masterarbeit**

**zur Erlangung des akademischen Grades**

**Master of Arts (M.A.)**

**im Fach Medienwissenschaft**

**Humboldt-Universität zu Berlin  
Kultur-, Sozial- und Bildungswissenschaftliche Fakultät  
Institut für Musikwissenschaft und Medienwissenschaft**

**eingereicht von** David Friedrich

**1. Gutachter:** Prof. Dr. Wolfgang Ernst  
**2. Gutachter:** Prof. Dr. Shintaro Miyazaki

**Berlin, den 06.04.2021**

It looks strange and it looks strange and it looks very strange; and then suddenly it doesn't look strange at all and you can't understand what made it look strange in the first place.

*Gertrude Stein*

---

## Inhalt

<b>1. Anklang</b> .....	2
<b>2. Präparation</b>	
Das Signal & die Fähigkeit zur Auswahl .....	8
Der Messakt & dessen Repräsentation .....	13
<b>3. Entscheidung</b>	
Eine medienwissenschaftliche Deutung der Quantentheorie ...	21
Ein ‚medientechn(olog)isches Unbestimmtheitsprinzip‘ .....	27
<b>4. Präsentation</b>	
Das sonische Signal via Computer .....	32
Das sonische Signal via Phonautograph .....	45
<b>5. Ausklang</b> .....	51
<b>6. Literaturverzeichnis</b> .....	55

**Anhang:** Eigenständigkeitserklärung

---

## Anklang

Als der Franzose Édouard-Léon Scott de Martinville im Juli 1857 erstmals in den Trichter seiner jüngsten Erfindung sang, präsentierte sich ihm jene Melodie in Form einer kontinuierlichen Welle.<sup>1</sup> Wie von selbst schrieb sich das von Scott de Martinvilles Stimmlippen produzierte Klangsignal – über eine an einer Membrane befestigten Schweineborste – schwingend in die mit Ruß bedeckte Darmhaut ein, weshalb der Kurzschluss zu William Henry Fox Talbots *The Pencil of Nature* für den Erfinder nahe lag:<sup>2</sup> „Is there a possibility of reaching, in the case of sound, a result analogous to that attained at present for light by photographic processes? Can it be hoped that the day is near when the musical phrase, escaped from the singer's lips, will be written by itself and as if without the musician's knowledge [...]?“<sup>3</sup> Scott de Martinville glaubte, eine Möglichkeit gefunden zu haben, in der sich ein vom Subjekt<sup>4</sup> befreiter, hörbarer Prozess auf einem Träger artikulierte und damit konträr zur jahrhundertlang geprägten, willkürlichen Musiknotation stand.<sup>5</sup> Geprägt von einer nahezu omnipräsenten, symbolischen Schriftkultur wird der Apparat schließlich 1857 zum Phonautograph getauft und patentiert; dessen Informationsträger<sup>6</sup> wird folglich als Phonautogramm bezeichnet.<sup>7</sup>

---

<sup>1</sup> Vgl. Feaster 2010, S. 52; Anm.: Es handelt sich hierbei um die älteste Aufnahme einer zusammenhängenden Melodie, die dem Musikwissenschaftler Patrick Feaster vorliegt. (Vgl. ebd.).

<sup>2</sup> Vgl. Kittler 1986, S. 44; vgl. Thomas Edison National Historical Park (a); vgl. Scott de Martinville 1857, S. 5ff; Anm.: Die Zitate von Scott de Martinville stammen aus einer durch Feaster zusammengeführten und aus dem Französischen übersetzten Sammlung von Schriften. Diese Schriften sind auch im Original in ihrer Datierung nicht eindeutig nachvollziehbar.

<sup>3</sup> Scott de Martinville 1857, S. 5.

<sup>4</sup> Um Diskriminierungen jeglicher Art zu vermeiden, wird in dieser Arbeit vom Subjekt oder vom Menschen gesprochen. In Anlehnung an Katherine Hayles ist der hier verwendete Subjektbegriff ein posthumaner und wird als eine „collection of heterogeneous components, a material-informational entity whose boundaries undergo continuous construction and reconstruction“ (Hayles 1999, S. 3) verstanden. Des Weiteren sei erwähnt, dass Zitate, die nicht gendergerecht formuliert sind, aus urheberrechtlichen Gründen nicht angepasst werden.

<sup>5</sup> Komponierenden blieb im Grunde bis zu Edisons Phonographen (1877) nur die symbolische Notation als Speicher von Musik; ein aus auf Linien angeordneten Punkten bestehender Code, dessen (De)codierung eine Kulturtechnik ist. (Vgl. Trippett 2013, S. 256f; vgl. Ernst 2012a, S. 19; vgl. Ernst 2016, S. 50; vgl. Friedrich 2018). Auch das Konzept Klang ist im Sinne des Musikwissenschaftlers Peter Wicke bereits „kulturalisierter Schall“ (Wicke 2008, S. 3) und somit schwingen hier nicht nur tradierte Konzepte des zu hörenden Untersuchungsgegenstandes mit, sondern ebenso ‚soziale Organisationen‘ nach Paul N. Edwards. „The ‚scale‘ of social organization runs from individual families and work groups to governments, economies, and multinational corporations. It is multiply and crucially crosscut by categories such as gender, ethnicity, and other identity constituting social formations.“ (Edwards 2003, S. 197) Da der Kulturbegriff als solcher schwer fassbar ist (vgl. Nünning 2009) und nicht Bestandteil dieser Arbeit sein kann, wird sich eher dem von Edwards beschriebenen, kulturprägenden Konzept der ‚social organisation‘ bedient.

<sup>6</sup> Der hier verwendete Terminus Information orientiert sich an Claude E. Shannons Informationstheorie, in der Ordnung als ein Träger von Information gilt. (Vgl. Shannon 1948, S. 6f; vgl. Kay 2001, S. 143f; vgl. Arnheim 1979, S. 25; vgl. Bense 1982, S. 153f; vgl. Weaver 1976, S. 18f) Auf den Terminus wird zu Beginn des ersten Kapitels eingegangen.

<sup>7</sup> Vgl. Feaster 2017; vgl. Scott de Martinville 1878, S. 27f; vgl. Kittler 1995, S. 289ff; Anm.: Während der für die heutige Medienwissenschaft bedeutsame Friedrich A. Kittler in *Aufschreibesysteme 1800/1900* anhand von Medien zunächst dem 18. Jahrhundert eine Kultur des Symbolischen und dem 19. Jahrhundert eine Kultur des Realen zuschreibt, materialisiert er bereits ein Jahr später in *Grammophon. Film. Typewriter* (1986) das eigentliche Konzept der Psychoanalyse von Lacan. (Vgl. Großmann 2016, S. 357; vgl. Kittler 1995, S. 289ff; vgl. Kittler 1986).

Bis heute wird die kontinuierliche Welle als natürliche Gesetzmäßigkeit in der Schalllehre unhinterfragt hingenommen.<sup>8</sup> Und demnach bleibt das im Phonautogramm erstmals als Welle gekleidete Signal<sup>9</sup> scheinbar derartig verführerisch, dass selbst im Zeitalter diskreter Rechenmaschinen kein Zweifel daran besteht. Nicht nur in der Akustik soll jenes hörbare Ereignis wellenförmig auftreten, sondern ebenso in der Welt des Elektronischen.<sup>10</sup> Auch wenn das einstige Schallsignal im elektromagnetischen Raum laut der Medienwissenschaftlerin Mara Mills dem Schwingungsverhalten im Akustischen grundsätzlich ähnelt, hebt der Medienwissenschaftler Wolfgang Ernst hervor, dass jene physikalische Schwingung nicht unmittelbar ist, sondern sich die unterschiedenen Signalwelten in der mathematischen Beschreibung der Schwingungsgleichung treffen.<sup>11</sup> Eben deshalb empfiehlt sich zur Beschreibung prinzipiell hörbarer Ereignisse – ganz gleich ob menschlich oder technisch vernommen – der Begriff des Sonischen, da laut Ernst nicht nur (Schall-)Ereignisse in der Akustik, sondern auch in technischen Apparaturen mitgemeint sind.<sup>12</sup> Selbst wenn sich die Signallaufzeiten in Schall- und Lichtgeschwindigkeit unterscheiden lassen, bleibt das sonische Signal als Wellenform in den Köpfen bestehen.<sup>13</sup> Die Vorstellung des vermeintlich natürlichen sonischen Signals schwingt somit in der Schwingung selbst mit.<sup>14</sup>

In *Chronopoetik* (2012) erinnert Ernst jedoch daran, dass der Kurzschluss zwischen dem Natürlichen und dem Kontinuierlichen – also dem wellenförmigen, sonischen Signal – ein unterstelltes Axiom ist: „Die Natur – so das Axiom – macht keine Sprünge, und Gott (so später Albert Einstein) würfelt nicht.“<sup>15</sup> Doch was heißt schon Natur? Laut dem Philosophen und Mathematiker Alfred N. Whitehead ist die ‚reinste Form‘ der Natur als solche durch den Menschen nicht rezipierbar.<sup>16</sup> Er verweist in *The Concept of Nature* (1920) auf die Prozesshaftigkeit, die der Natur inne liegt; ein unaufhaltsamer, sich andauernd verändernder Prozess, der sich in dieser Form dem Menschen nie direkt

<sup>8</sup> Vgl. Maury *et al.* „The Nature of Waves“; vgl. Loy 2006, S. 1ff; vgl. Oliver & Shannon 1957, Sp. 1f; vgl. Wicke 2008, S. 1; vgl. Ernst 2012b, S. 270; vgl. Strutt 1877, S. 17; vgl. Weaver 1976, S. 12; vgl. Watkinson 2001, S. 36; vgl. Pflüger 2005, S. 20.

<sup>9</sup> Das Signal als solches ist in dieser Arbeit als ein technisches zu verstehen und vom zwischenmenschlichen Signal, wie etwa dem Signalisieren von ‚Achtung!‘ via ‚Signalweste‘, zu unterscheiden. (Vgl. Richter 1985, S. 31).

<sup>10</sup> Vgl. Hartley 1928, S. 542f, 558ff; vgl. Weinzierl 2008, S. 11f.

<sup>11</sup> Vgl. Mara Mills zitiert in: Ernst 2015, S. 144; vgl. Ernst 2015, S. 144.

<sup>12</sup> Vgl. ebd., S. 14; Anm.: Auch der Medienwissenschaftler Shintaro Miyazaki spricht vom Sonischen als „den Klang betreffend“ (Miyazaki 2013, S. 16). Zusätzlich unterscheidet dieser nochmal zwischen dem Sonischen und dem Trans-Sonischen, welches im Grunde unhörbare Prozesse sonifiziert. (Vgl. ebd., S. 260) Jonathan Sterne hingegen argumentiert eher für einen anthropozentrischen Ansatz, der jedoch in der vorliegenden Arbeit keine Verwendung findet. (Vgl. Sterne 2003, S. 19).

<sup>13</sup> Vgl. Ernst 2012b, S. 89, 93, 98; Anm.: Erste erfolgreiche Versuche bzgl. der Registrierung der Signallaufzeit in der Akustik wurden laut John W. Strutt bereits 1738 durchgeführt. (Vgl. Strutt 1877, S. 2f) Die exakte Messung der Lichtgeschwindigkeit wurde 1935 von Michelson *et al.* in *Measurement of the Velocity of Light in a Partial Vacuum* beschrieben. (Vgl. Michelson *et al.* 1935) Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass die Signallaufzeit nicht mit der Bewegung von Materie, der Driftgeschwindigkeit, gleichzusetzen ist. (Vgl. Kuypers 2012, S. 55f).

<sup>14</sup> Vgl. Loy 2006, S. 1.

<sup>15</sup> Ernst 2012b, S. 270.

<sup>16</sup> Vgl. Whitehead 1920, S. 72; vgl. Eddington 1927, S. 225.

erschließt.<sup>17</sup> Die durch Whitehead postulierte Vorstellung von Natur ist eine von Raum und Zeit befreite, die auch ohne unser Zutun geistiger Leistung als solche bestehen bleibt – eben als Prozess – und kann paradoxer Weise nicht ohne Weiteres geistig begriffen werden:<sup>18</sup> „As in the case of everything directly exhibited in sense-awareness, there can be no explanation of this characteristic of nature.“<sup>19</sup> Erst provozierte raumzeitliche Relationen ermöglichen es dem Menschen, physikalische und biologische Veränderungen mit den ihm zur Verfügung gestellten Sinnen zu begreifen – so Whitehead in *An Enquiry Concerning the Principles of Natural Knowledge* (1919).<sup>20</sup>

Zwar kann der Mensch beispielsweise die Schwingung einer Gitarrenseite visuell ausmachen – sehen, dass die Seite nicht stillsteht –, jedoch erschließt sich die eigentliche Information der Bewegung bzw. der Zustände erst im Akt der Messung, den so erzeugten raumzeitlichen Relationen.<sup>21</sup> Folglich offenbart sich jene Information dem Menschen nur im Lichte des in Vollzug gesetzten Messapparats bzw. der von ihm dargestellten Repräsentation jenes Vollzugs.<sup>22</sup> Das Kontinuierliche als solches ist demnach zunächst nicht existent im Sinne eines in der Natur Vorhandenen, wie der Physiker Werner Heisenberg hervorhebt: „[W]ir müssen uns daran erinnern, daß das, was wir beobachten, nicht die Natur selbst ist, sondern Natur, die unserer Art der Fragestellung ausgesetzt ist.“<sup>23</sup> Dies trifft ebenso auf das sonische Signal zu, dessen Wesen nicht durch die Natur determiniert ist. Vielmehr handelt es sich um einen zeitkritischen Prozess, der laut Ernst erst durch techn(olog)ische<sup>24</sup> Messmedien zur wahrgenommenen Realität wird.<sup>25</sup> Demnach ist das Beobachtete, vom Mensch als ‚natürlich‘ Kontinuierliches verstanden, Wahrnehmung innerhalb einer Zeitspanne, womit der in der Wissenschaft durch einen Zeitpunkt bezeichnete (Mess-)Wert selbst nicht mehr dem Natürlichen entsprechen kann.<sup>26</sup> Mehr noch: Die Zeit geht als eigenes Maß in den Registrierungsakt von Natur ein und erzeugt überhaupt erst die Möglichkeit von Relationen durch Erschaffung von Raum, wie der Philosoph Martin Heidegger in *Sein und Zeit* (1927) verdeutlicht:<sup>27</sup> „Die Zeit wird nicht erst mit dem Raum verkoppelt, sondern der vermeintlich zu verkoppelnde ‚Raum‘ begegnet nur auf dem Grunde der zeitbesorgenden Zeitlichkeit.“<sup>28</sup> Das Messmedium drückt im Moment der Repräsentation einen vollzogenen Prozess raumzeitlich aus und bietet damit dem Menschen eine spezielle Facette von Natur an.

---

<sup>17</sup> Vgl. Whitehead 1920, S. 53f.

<sup>18</sup> Vgl. ebd., S. 72.

<sup>19</sup> Vgl. ebd., S. 53f.

<sup>20</sup> Vgl. Whitehead 1919, S. 4.

<sup>21</sup> Vgl. ebd., S. 6; vgl. Richter 1985, S. 15; vgl. Baird 2004, S. 5; vgl. Whitehead 1978, S. 34; vgl. Magnusson 2019, S. 125; Anm.: Der Wahrnehmungsapparat des Menschen ist schlichtweg zu träge, als dass er Information aus den einzelnen Schwingungen entnehmen könnte. (Vgl. ebd.).

<sup>22</sup> Vgl. Richter 1985, S. 15; vgl. Baird 2004, S. 5; vgl. Ernst 2012b, S. 27.

<sup>23</sup> Heisenberg 1979a, S. 60.

<sup>24</sup> Im Sinne Ernsts wird unterschieden zwischen technischen Medien, wie etwa dem Phonautographen, und technologischen Medien, wie etwa dem Computer. (Vgl. Ernst 2020).

<sup>25</sup> Vgl. Ernst 2012b, S. 25, 27; vgl. Wind 2001, S. 70ff.

<sup>26</sup> Vgl. Whitehead 1919, S. 8, 13.

<sup>27</sup> Vgl. ebd., S. 25; vgl. Günther 1996, S. 112.

<sup>28</sup> Heidegger 1953, S. 417.

Messmedien bilden somit die für die Wahrnehmung des Menschen bedeutsamen raumzeitlichen Relationen und erst diese durch das Medium präparierten Relationen erzeugen im Individuum so etwas wie Welt<sup>29,30</sup> Oder kurz gesagt: „Medien ‚definieren, was wirklich ist.‘“<sup>31</sup> Demzufolge ist das Verständnis weltlicher Prozesse, wie etwa das des sonischen Signals, abhängig von techn(olog)ischen Medien; deren *Erfindung* hängt wiederum vom Wissen des Weltlichen ab.<sup>32</sup> Nicht ohne Grund bezeichnet der Medienwissenschaftler Shintaro Miyazaki Subjekt und Objekt als „strangely and recursively entangled.“<sup>33</sup>

Eben deshalb wirkt es schon ein wenig grotesk, wenn exakt ein Jahrhundert nach Scott de Martinvilles ‚Klang-Selbst-Aufschreibers‘ die Ingenieure Bernard M. Oliver und Claude E. Shannon in ihrem Patent für *Communication System Employing Pulse Code Modulation*<sup>34</sup> (1957) ein diskontinuierliches Signal vorstellen, welches mit dem Vokabular der durch den Phonautographen erzeugten Relationen diskriminiert wird: „[A] complex **wave** form is sampled at frequently recurring intervals of time [...]“<sup>35</sup> Oliver und Shannon gehen bereits vor dem Erschließen des sonischen Signals via Messmedium davon aus, dass das zu übertragende diskontinuierliche Signal aus einer Umwandlung eines zuvor Kontinuierlichen hervorgeht – das bekannte Axiom lässt grüßen.<sup>36</sup> Tatsächlich bricht ihr beschriebenes System mit der durch den Phonautograph erzeugten Wirklichkeit, da es selbst ‚weltbildend‘ ist.

THE DUALITY OF SOUND widmet sich der medientechn(olog)ischen Präsentation raumzeitlicher Relationen zeitkritischer Prozesse und verdeutlicht anhand des sonischen Signals die zentrale Rolle der techn(olog)ischen Messmedien in Bezug auf die Erzeugung von so etwas wie Welt.<sup>37</sup>

Die Arbeit beginnt mit dem Kapitel PRÄPARATION, das ein Fundament der Arbeit vorbereitet. Zunächst soll sich mittels der Informationstheorie dem Signal als solches

<sup>29</sup> Zum Weltbegriff in der vorliegenden Arbeit: In Anlehnung an Whitehead und Ernst münden die aus den Messungen hervorgebrachten Facetten von Natur als Summiertes in so etwas wie das Seinverständnis von Welt. (Vgl. Ernst 2012b, 27; vgl. Whitehead 1919, S. 13. vgl. Heidegger 1953, S. 12) Der Akt der Messung ist wiederum durch die Auswahl des Mediums sowie des Versuchsaufbaus durch das Subjekt und dessen sozialen Organisationen – im Sinne Edwards – geprägt. (Vgl. Barad 2007, S. 130, 199) Demnach ist das Seinverständnis von Welt immer als amorpher Prozess zu verstehen; ein Konglomerat aus Objekt und Subjekt.

<sup>30</sup> Vgl. Ernst 2012a, S. 293; vgl. Ernst 2012b, S. 27; vgl. Whitehead 1919, S. 13; vgl. Hansen 2011, S. 372; Anm.: Anstelle von Relationen ließe sich ebenso auf Basis des Narrativen die gleiche Argumentation anführen: „[H]umans still continue to express their inner time consciousness in term of past, present and future [...] – a vocabulary which derives from a narrative ordering of time [...]“ (Ernst 2017, S. 12).

<sup>31</sup> Kittler 1986, S. 10.

<sup>32</sup> Vgl. Wind 2001, S.75; vgl. Barad 2007, S. 196; vgl. Miyazaki 2020, S. 3.

<sup>33</sup> Ebd.

<sup>34</sup> Bereits zwei Monate vor der Anmeldung des Patents durch Oliver & Shannon Feb. 1946, meldete John R. Pierce im Dez. 1945 unter dem gleichen Titel sein Patent an. Die drei veröffentlichten später gemeinsam *The Philosophy of PCM* (1948). (Vgl. Miyazaki 2013, S. 206).

<sup>35</sup> Oliver & Shannon 1957, Sp. 2 [*Hervorhebung durch Autor DF*].

<sup>36</sup> Vgl. ebd.

<sup>37</sup> Anders als in Prof. W. Ernsts Kolloquium *Medien, die wir meinen* (17.02.2021) vorgestellt, findet keine klassische Beschreibung des  $\Sigma\Delta$ -ADCs zu Beginn dieser Arbeit statt. Damit soll schlichtweg die Reproduktion dessen, was mit dieser Arbeit kritisiert wird, vermieden werden.

angenähert und so das Verhältnis zwischen Information und materieller bzw. energetischer Physik ausgelotet werden, um daraufhin jenes Signal mit der Erzeugung von so etwas wie Welt verkoppeln zu können. Es wird sich zeigen, dass das Signal im Allgemeinen die Fähigkeit besitzt, im Rahmen der besorgten Zeit (Heidegger) ordnungsstiftende, raumzeitliche Relationen (Whitehead) zu bilden. Im Anschluss daran wird sich dem Signal im Akt der Messung gewidmet. Das in der Quantentheorie oft zitierte Doppelspaltexperiment dient hierbei als Beispiel, da es die strenge Verbindung zwischen ausgewähltem Messapparat und offenbarem Phänomen darstellt, was der ‚klassischen‘ Physik jedoch widerspricht.<sup>38</sup> Dabei wird sich nicht nur zeigen, wie das in der Messung Offenbare zu deuten ist, sondern, dass die eigentliche Eigenschaft eines Objekts von Interesse – Licht genauso wie Sound<sup>39</sup> – erst aus der Repräsentation hervorgeht.<sup>40</sup> Außerdem wird bereits hier deutlich, dass eine Beschreibung des Signals als solches nie ohne Berücksichtigung des techn(olog)ischen Geräts möglich ist, womit die Präparation eines jeden Messaktes bereits entscheidend für die Erzeugung von etwas wie Welt ist.

Nachdem ein Fundament errichtet wurde, soll sich im zweiten Kapitel ENTSCHEIDUNG der Frage angenommen werden, wie der Ort oder der Impuls eines Objekts von Interesse gemessen wird. Es wird sich zeigen, dass dafür zwei sich gegenseitig ausschließende Messverfahren von Nöten sind, die sich schließlich im techn(olog)ischen Messkörper wiederfinden. In Anlehnung an Heisenberg findet hier eine medienwissenschaftliche Deutung des Messaktes statt: das herausgearbeitete ‚techn(olog)ische Unbestimmtheitsprinzip‘ zeigt, dass die Möglichkeit der Bildung raumzeitlicher Relationen durch zwei medientechn(olog)ische ‚Anatomietypen‘ beschränkt ist. In Anlehnung an die feministisch orientierte Wissenschaftsphilosophin sowie Physikerin Karen Barad lässt sich argumentieren, dass das Messobjekt zwar einen Körper besitzt (sex), dieser sich jedoch immer im Diskurs (gender) des Subjekts wiederfindet.<sup>41</sup> Demnach kann das Messmedium nie rein objektiv sein, da bereits mit der Entscheidung, also mit der Wahl des Messinstruments, die Bildung von so etwas wie Welt bereits entschieden ist.<sup>42</sup> Doch wie Barad hervorhebt ist die Diskursbildung nie einseitig, sondern auch immer rekursiv zu denken,<sup>43</sup> weshalb das ‚medientechn(olog)ische Unbestimmtheitsprinzip‘ die Beschreibung eines sonischen Signals auf Grundlage des Messapparats ermöglicht. Mehr noch: Sobald die diskontinuierliche Natur neben der kontinuierlichen zu etwas Legitimen wird, lässt sich die Erzeugung von so etwas wie Welt durch raumzeitliche Relationen mittels Signal konkret herausarbeiten.

<sup>38</sup> Vgl. Niels Bohr zitiert in: Münster 2020, S. 19; vgl. Barad 2007, S. 199; vgl. Ananthaswamy 2018, S. 16.

<sup>39</sup> Der Begriff Sound wird in dieser Arbeit generisch verwendet und kann als Synonym des Sonischen angesehen werden.

<sup>40</sup> Vgl. Ananthaswamy 2018, S. 13; vgl. Wheeler 1983, S. 185.

<sup>41</sup> Vgl. Barad 2007, S. 189ff; vgl. Butler 2011, S. xvii; vgl. Haraway 2017, S. 220; Anm.: Es wird unterschieden zwischen dem biologischen ‚sex‘ „(Hormone, Gene, Nervensystem, Morphologie)“ (ebd., S. 208) und dem gesellschaftlichen Konstrukt ‚gender‘. (Vgl. ebd., S. 207ff).

<sup>42</sup> Vgl. Haraway 2017, S. 220; vgl. Miyazaki 2020, S. 3.

<sup>43</sup> Vgl. Barad 2007, S. 203.



Zwei unterschiedliche Signalwesen präsentieren sich schließlich im letzten Kapitel dieser Arbeit. Auf der einen Seite offenbart sich das sonische Signal via Computer, der mit seiner medientechnologischen Extremität des Sigma Delta Analog-to-Digital Converters ( $\Sigma\Delta$ -ADC)<sup>44</sup> die performende Mikrophonmembrane in der -kapsel verortet und mittels interner Clock organisiert. Vor allem die im zweiten Kapitel angesprochene ‚statistische Deutung‘ nimmt eine zentrale Rolle in der Argumentation des sonischen Signals im System Computer ein, da hier die Ortsmessung mit dem technologischen Artefakt verschränkt wird. Während im Computer das sonische Signal die Bildung raumzeitlicher Relationen diskontinuierlich realisiert, ändert sich mit Wechsel des Messmediums auch das Wesen des Signals. Deshalb wird im Anschluss anhand des Phonautographen gezeigt, wie die Bildung raumzeitlicher Relationen auf das Phonautogramm gelangt: Während das sonische Signal via Computer den Raum zeitigt, offenbart sich im Falle des Phonautographen ein Wesen, das aus der Zeitigung des Raumes hervorgeht. Am Ende zeigt sich die Erzeugung von so etwas wie Welt im kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Gewand; in Abhängigkeit vom Messmedium offenbart sich die Doppelnatur des sonischen Signals.

Die vorliegende Arbeit verzichtet auf die Terminologie Analog/Digital. Damit soll sich diesem Diskurs zunächst entzogen werden, um daraufhin am Ende (AUSKLANG) als ‚frischer Wind‘ in diese festgefahrene Debatte wieder einzukehren. Außerdem provoziert THE DUALITY OF SOUND eine Neuaushandlung Kittlers materialisierter Psychoanalyse, da das Reale nicht mehr nur ‚Grammophon und Co.‘ zugeschrieben werden muss, sondern womöglich zukünftig unterschieden werden sollte zwischen realem und symbolischem Code. Des Weiteren lassen sich die hier herausgearbeiteten Erkenntnisse interdisziplinär nutzen, da die Kontroverse des diskontinuierlich Natürlichen in nahezu jeder Disziplin anzutreffen ist. Vor allem die im Ausklang angepriesene ‚Zeit-Hirn-Schranke‘, die dem Kurzschluss zwischen  $\Sigma\Delta$ -ADC und Cochlea entspringt, lässt sich als eine Aussicht des hier Entwickelten anführen.

---

<sup>44</sup> Die Wahl des  $\Sigma\Delta$ -ADCs ist in der technologischen Funktionsweise begründet, die sich deutlich von anderen, wie etwa dem Prinzip der sukzessiven Approximation, unterscheidet. Hinzu kommt, dass aufgrund der hohen Auflösung sowie günstigen Produktion, also der Wirtschaftlichkeit, das  $\Sigma\Delta$  Verfahren heutzutage fast ausschließlich genutzt wird. (Vgl. Stotz 2011, S. 48f; vgl. Werwein & Schick 2008, S. 886, 891). Des Weiteren bietet die Funktionsweise des  $\Sigma\Delta$ -ADC die Möglichkeit, eine klare Analogie zur Quantentheorie zu bilden, die zentral für die hier aufgestellte Argumentation ist. Damit erdet der  $\Sigma\Delta$ -ADC das Argument technologisch.

# PRÄPARATION

---

## Das Signal & die Fähigkeit zur Auswahl

Der Mensch ist ein defizitärer Wahrnehmungsapparat; ein aus Fleisch bestehendes, träges Registrierungsinstrument, welches zeitkritische Prozesse nur suboptimal erfasst. So ‚verschmieren‘ beispielsweise einzelne Schläge ab 16 pro Sekunde zu einem Brummtönen und auch festgehaltene Augenblicke werden wieder dynamisch, wenn denn die Bildrate hoch genug ist.<sup>45</sup> Dies ist jedoch nicht nur eine Erkenntnis, die aus der Gegenüberstellung von menschlich Wahrgenommenem und techn(olog)isch Vernommenem resultiert. Es handelt sich hierbei um ein Bewusstwerden von so etwas wie Welt, die es laut der Medienwissenschaftlerin Sybille Krämer ohne Apparatur nicht gäbe: „[D]ie Technik als Apparat [...] bringt künstliche Welten hervor, sie eröffnet Erfahrungen und ermöglicht Verfahren, die es ohne Apparaturen nicht etwa abgeschwächt, sondern überhaupt nicht gibt. Nicht Leistungssteigerung, sondern Welterzeugung ist der produktive Sinn von Medientechnologien.“<sup>46</sup> Messmedien erzeugen Welt indem raumzeitliche Relationen für das Subjekt präpariert werden, die sich ohne techn(olog)ische Apparatur der menschlichen Wahrnehmung schlichtweg entziehen.<sup>47</sup> Bevor sich jedoch der tatsächlichen Repräsentation von so etwas wie Welt angenommen werden kann, wird sich dem ‚Grundstoff‘ – im metaphorischen Sinne – der Welterzeugung gewidmet: dem Signal als solchem. Ausgehend von Claude E.

---

<sup>45</sup> Vgl. Moles 1971, S. 103; vgl. Ernst 2008, S.158f.

<sup>46</sup> Krämer 2000, S. 85.

<sup>47</sup> Vgl. Ernst 2012a, S. 293; vgl. Ernst 2012b, S. 27; vgl. Whitehead 1919, S. 4; vgl. Hansen 2011, S. 372.

Shannons Informationstheorie soll sich im Folgenden dem Signalbegriff angenähert werden, um daraufhin dessen ‚ordnungsstiftende‘ Bildung von ‚spatio-temporal relations‘<sup>48</sup> und der damit einhergehenden ‚Welterzeugung‘ aufzuzeigen. Eine exakte Bestimmung des Signals findet jedoch erst im Kapitel PRÄSENTATION statt, wo eine eng an der techn(olog)ischen Apparatur geführte medientheoretische Deutung des sonischen Signals erfolgt.

Als der Ingenieur und Mathematiker Shannon 1948 im *The Bell System Technical Journal* die Kommunikation zwischen technischen Apparaten mathematisch beschrieb, ging es ihm weniger um den Inhalt einer Nachricht als vielmehr um die Mindestanforderung, der der Kanal entsprechen muss, damit eine Nachricht als solche bestmöglich übermittelt werden kann.<sup>49</sup> „[S]emantic aspects of communication are irrelevant to the engineering problem. The significant aspect is that the actual message is one *selected from a set* of possible messages. The system must be designed to operate for each possible selection“<sup>50</sup> – so der Mathematiker in seiner als Informationstheorie bekannten Schrift.<sup>51</sup> Auch wenn Shannons Theorie sich den technischen Problemen der Kommunikation widmet – also „wie genau verschiedene Arten von Signalen vom Sender zum Empfänger übertragen werden“<sup>52</sup> –, bleibt diese nichtsdestotrotz durch die Prägung des Informationsbegriffs für die Herausarbeitung des Signalbegriffs bedeutsam, wie sich im Folgenden zeigen wird.

Zunächst einmal wird in Shannons Informationstheorie das Signal im Allgemeinen nicht thematisiert, wie die Wissenschaftshistorikerin Lily E. Kay hervorhebt:<sup>53</sup> „[W]as diese Signale bezeichnen oder bedeuten, oder worin ihr Wahrheitsgehalt besteht, lässt sich aus dieser Kommunikationstheorie nicht ableiten.“<sup>54</sup> Demnach wird der Signalbegriff – wenn überhaupt – generisch verwendet, um auszudrücken, dass eine durch den Sender erzeugte Nachricht via Kanal zum Empfänger gelangt.<sup>55</sup> Viel entscheidender ist für Shannon der Begriff der Information, welcher als „Maß für die Freiheit der Wahl“<sup>56</sup> einen Betrag angibt, den sogenannten Informationsgehalt.<sup>57</sup> Mit diesem lässt sich schließlich die Mindestanforderung eines Kommunikationssystems

---

<sup>48</sup> Whitehead 1919, S. 4.

<sup>49</sup> Vgl. Shannon 1948; Vgl. Weaver 1976, S. 14; vgl. Buchhaupt 2003, S. 291; vgl. Kay 2001, S. 142, 145; Anm.: Laut Lily E. Kay bezweifelte Shannon später, dass die „Anwendbarkeit der Informationstheorie über den Ingenieurbereich hinaus [...] berechtigt“ (ebd., S. 178) ist.

<sup>50</sup> Shannon 1948, S. 3.

<sup>51</sup> Vgl. Kay 2001, S. 142; Anm.: Kay erinnert daran, dass eine zeitlang auch die Rede von der Wiener-Shannon-Kommunikationstheorie (vgl. ebd., S. 138) war, da „Shannons mathematische Kommunikationstheorie [...] Wieners kybernetische Arbeit ergänzte und weiterführte [...]“. (Ebd., S. 136) „Obwohl Shannon und Wiener unabhängig voneinander arbeiteten, erwiesen sich ihre Begriffsrahmen als erstaunlich verwandt [...]. Wiener definierte Information als negative Entropie, während Shannon die übliche Entropieformel verwandte, ohne Änderung des Vorzeichens.“ (Ebd., S. 137).

<sup>52</sup> Weaver 1976, S. 14.

<sup>53</sup> Vgl. Shannon 1948, S. 4f; vgl. Kay 2001, S. 145.

<sup>54</sup> Ebd.

<sup>55</sup> Vgl. Shannon 1948, S. 4.

<sup>56</sup> Kay 2001, S. 144.

<sup>57</sup> Vgl. ebd., S. 144f; vgl. Shannon 1948, S. 4; vgl. Moles 1973, S. 17.

0000	0001	0010	0100
1000	0011	0101	1001
1100	1010	0110	0111
1011	1101	1110	1111

Abb. 1.:  $2^4 = 16$  konkrete Ordnungszustände.

(„discrete, continuous and mixed“<sup>58</sup>) bestimmen.<sup>59</sup> Der Informationsgehalt ist folglich – und in den Worten des Informationstheoretikers Abraham A. Moles – „nur ein Ausdruck für die strukturelle Komplexität der Nachricht“<sup>60</sup>; im Grunde eine Angabe der ‚Auflösung‘, die das ganze System betrifft.<sup>61</sup>

Laut dem Medienwissenschaftler und Kunstpsychologen Rudolf Arnheim heißt „Information übermitteln [...] Ordnung schaffen.“<sup>62</sup> Ordnung kann folglich – weiter Arnheim – als ein Maß der Information betrachtet werden, „weil Ordnung als das Gegenteil von Entropie definiert ist und Entropie als das Maß für Unordnung gilt.“<sup>63</sup> Und da in der Informationstheorie eine jede Nachricht mittels ‚Transmitter‘ informiert bzw. in ‚Ordnung‘ gebracht wird, um ein für den Kanal passendes Signal produzieren zu können,<sup>64</sup> lässt sich behaupten, dass Signal und Information in gewisser Weise miteinander verquickt sind. Folglich geht aus der strukturalen Komplexität ebenso eine ganz konkrete ‚Ordnung‘ hervor, nämlich immer dann, wenn Information im zeitkritischen Prozess als Signal realisiert wird.<sup>65</sup>

Das Signal als solches wird dabei oftmals vermeintlich als Träger von Information beschrieben.<sup>66</sup> Dies verleitet jedoch zur Annahme, dass Information etwas ‚greifbares‘ –

<sup>58</sup> Shannon 1948, S. 4.

<sup>59</sup> Vgl. ebd.; vgl. Buchhaupt 2003, S. 291; Anm.: Selbst wenn das als Einheit der Information bezeichnete Bit („binary digit“) (Shannon 1948, S. 3) heute oftmals als eine physikalische Größe diskreter Systeme verstanden wird, behandelt Shannons Theorie auch den kontinuierlichen Bereich der Kommunikation. (Vgl. ebd., S. 33ff; vgl. Buchhaupt 2003, S. 277). Das Bit ist inzwischen in die Alltagssprache der Informationsgesellschaft eingedrungen. Nichtsdestotrotz muss immer wieder daran erinnert werden, dass die im binären System bezeichnenden Ziffern 0 oder 1 keineswegs als solche im Computer auftreten, sondern stellvertretend für deutlich zu unterscheidende Spannungsdifferenzen stehen. (Vgl. Rechenberg 2000, S. 45).

<sup>60</sup> Moles 1973, S. 17.

<sup>61</sup> Vgl. ebd.; vgl. Kay 2001, S. 141; vgl. Buchhaupt, S. 291; vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 790; Anm.: Der Betrag der Information wird mathematisch als  $H_n = -\sum p_i \log p_i$  ausgedrückt. (Vgl. Weaver 1976, S. 24).

<sup>62</sup> Arnheim 1979, S. 25.

<sup>63</sup> Ebd.

<sup>64</sup> Vgl. Shannon 1948, S. 4; Anm.: „A transmitter which operates on the message in some way to produce a signal suitable for transmission over the channel.“ (Ebd.).

<sup>65</sup> Vgl. Bense 1982, S. 153f; Anm.: Ein binäres Kommunikationssystem kann beispielsweise eine Auflösung von 4 Bit besitzen, womit  $2^4 = 16$  konkrete Ordnungszustände (Abb. 1) genutzt werden können, um als Signal gekleidet ‚irgendetwas‘ auszudrücken. (Vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 790) Ordnungszustände müssen jedoch nicht binärer Natur sein, wie im Falle der DNA, wo vier Basen als Sequenz die Information eines organischen Individuums ausdrücken. (Vgl. Friedrich 2019).

<sup>66</sup> Vgl. Hermann „Signale“ (Vorlesungsskript WS 2010/2011), S. 1; vgl. Strohrmann „Stochastische Signale“.

im Sinne von Materie oder Energie – wäre. Kritisiert wird solch eine Vorstellung vom Mathematiker Norbert Wiener, der deutlich unterscheidet: „Information ist Information, weder Materie noch Energie. Kein Materialismus, der dieses nicht berücksichtigt, kann heute überleben.“<sup>67</sup> Stattdessen ist die Ordnung selbst Träger von Information, so Arnheim.<sup>68</sup> Und weil Signale auch im Sinne des Kognitionswissenschaftlers Collin Cherry „nicht Information [übermitteln], wie etwa Güterzüge Kohle transportieren“, entspricht es viel mehr der entliehenen Logik der Informationstheorie, wenn Signale zeitkritische Prozesse durch ihre „Fähigkeit zur Auswahl“<sup>69</sup> bestimmen.<sup>70</sup> Dies erlaubt es schließlich, anhand der physikalischen Ereignisse von ‚Registrierungsobjekten‘, wie etwa der Membrane eines Mikrophons oder der des Phonautographen, die ‚Fähigkeit zur Auswahl‘ zu repräsentieren und damit das Signal zu definieren, was im Kapitel PRÄSENTATION konkret wird.<sup>71</sup> Diese ordnungstiftende Fähigkeit eines jeden Signals – und damit ebenso die Bildung von Information –, erzeugt letztlich so etwas wie Welt, derer sich als nächstes angenommen wird.

Der Philosoph und Mathematiker Alfred N. Whitehead bezeichnet die Natur als einen irreversiblen Prozess,<sup>72</sup> der als solcher erst mittels raumzeitlicher Relationen durch das Subjekt erschlossen werden kann: „[T]he ultimate facts of nature, in terms of which all physical and biological explanation must be expressed, are events connected by their spatio-temporal relations [...]“.<sup>73</sup> Whitehead begründet die Bildung von Relationen durch eine zeitkritische Rezeption des Raumes,<sup>74</sup> was sich mit der Vorstellung des Philosophen Martin Heidegger deckt – zumindest bezüglich der Tatsache, dass der Zeit als solche eine raumbildende Kraft unterstellt wird:

Weil die Zeitlichkeit des faktischen In-der-Welt-seins ursprünglich die Raumerschließung ermöglicht und das räumliche Dasein je aus einem entdeckten Dort sich ein daseinsmäßiges Hier angewiesen hat, ist die in der Zeitlichkeit des Daseins besorgte Zeit hinsichtlich ihrer Datierbarkeit je an einen Ort des Daseins gebunden.<sup>75</sup>

Während Heidegger einem irreversiblen Naturprozess im Sinne Whiteheads vermutlich eine nichtumkehrbare ‚vulgäre‘ Zeitlichkeit zusprechen würde, deren „natürliches Recht“<sup>76</sup> aus einer „Folge von ständig ‚vorhandenen‘“ und „zugleich vergehenden“ sowie „ankommenden Jetzt“<sup>77</sup> entspringt, fußt das Vergegenwärtigen von so etwas wie

<sup>67</sup> Wiener 1968, S. 166.

<sup>68</sup> Arnheim 1979, S. 25.

<sup>69</sup> Collin Cherry zitiert in: Kay 2001, S. 178.

<sup>70</sup> Vgl. Collin Cherry zitiert in: Kay 2001, S. 178.

<sup>71</sup> Vgl. Richter 1985, S. 23; Anm.: „Die erste Funktionseinheit einer Meßeinrichtung hat immer die Aufgabe, die gesuchte Information so auf eine physikalische Größe abzubilden, daß sie bestimmbar und bewertbar wird.“ (Ebd.).

<sup>72</sup> Vgl. Whitehead 1920, S. 53f.

<sup>73</sup> Whitehead 1919, S. 4.

<sup>74</sup> Vgl. ebd., S. 6.

<sup>75</sup> Heidegger 1953, S. 417.

<sup>76</sup> Ebd., S. 426.

<sup>77</sup> Ebd., S. 422.

Welt in der besorgten Zeit, die eine „scheinbar selbstverständliche Bezugsstruktur“<sup>78</sup> von ‚jetzt, dann, damals‘ besitzt.<sup>79</sup> Es ist jedoch eben diese ‚zeitbesorgte Zeitlichkeit‘, deren Struktur Ordnung als solche überhaupt erst schafft; eine Ordnung, die laut Heidegger mit dem Raum verkoppelt ist, dem Subjekt schließlich begegnet und erst dann so etwas wie Welt ausbildet.<sup>80</sup> Wie verhält sich das Signal als solches nun dazu?

In Anlehnung an den Medienwissenschaftler Wolfgang Ernst sind jene Signale durch „genuine Zeitereignisse“<sup>81</sup> in ihrer (elektro-)physikalischen Form definiert.<sup>82</sup> Das Signal als zeitkritischer Prozess begegnet dem Subjekt im Moment einer (bio-)physikalischen geordneten Zeitstruktur und erst diese durch das Signal realisierte Form von Information, also die gezeitigte Ordnung, ist laut Arnheim eine Notwendigkeit, wenn Mensch überhaupt verstehen möchte.<sup>83</sup> Zwar ist Information als Maß von Ordnung nicht materiell oder energetisch per se ‚greifbar‘, doch ist es erst die raumzeitliche Verquickung physikalischer Prozesse, die einen Ordnungszustand auszudrücken vermag. Demnach liegt die Fähigkeit des Signals als solchem in der zeitkritischen Auswahl, die einen Ordnungszustand provoziert und schließlich dadurch überhaupt erst Information ‚In-der-Welt‘ verkörpert. „In-der-Welt-Sein heißt In-der-Zeit-Sein“<sup>84</sup> – und dies gilt vice versa! Denn auf der anderen Seite sind es erst die raumzeitlichen Relationen, die so etwas wie Welt erzeugen – die Doppelnatur lässt bereits jetzt grüßen.<sup>85</sup> Kurz gesagt: Information ist weder Materie noch Energie, doch das Signal bedient sich ihrer um Information – im Sinne von Ordnung – überhaupt erst zu erzeugen.

Insbesondere den Messmedien kommt eine entscheidende Stellung bei der Erzeugung von so etwas wie Welt zu, wie Ernst hervorhebt: „Zeitkritische Prozesse als wahrgenommene Realität sind erst mit jenen Meßmedien zu einem Wissensgegenstand geworden, die sie zu erfassen und zu rechnen wußten.“<sup>86</sup> Folglich erschließt sich dem Subjekt so etwas wie Welt erst durch das konkrete Signal als repräsentierte raumzeitliche Relation, ausgedrückt via techn(olog)ischer Apparatur, wie der Medienwissenschaftler Mark Hansen meint: „Medien transformieren grundlegend, *wie* wir erfahren und erleben oder, besser gesagt, wie wir in und aus ebendiesem Erfahrungsprozess heraus komponiert und verfasst sind.“<sup>87</sup> Mit den entliehenen Worten des Elektroingenieurs Andres Keller lässt sich das Signal folglich als Repräsentation „einer Information durch

---

<sup>78</sup> Vgl. Heidegger 1953, S. 407.

<sup>79</sup> Vgl. ebd., S. 422; Anm.: „Daß zu dem mit dem ‚jetzt‘, ‚dann‘ und ‚damals‘ Ausgelegten wesentlich die Struktur der Datierbarkeit gehört, wird zum elementarsten Beweis für die Herkunft des Ausgelegten aus der sich auslegenden Zeitlichkeit“ (Ebd., S. 408).

<sup>80</sup> Vgl. ebd., S. 407; vgl. Whitehead 1919, S. 4ff; Anm.: „Zum Dasein gehört [...] wesentlich: Sein in der Welt. Das dem Dasein zugehörige Seinsverständnis betrifft daher gleichursprünglich das Verstehen von so etwas wie ‚Welt‘ und Verstehen des Seins des Seienden, das innerhalb der Welt zugänglich ist.“ (Heidegger 1953, S. 13).

<sup>81</sup> Ernst 2012b, S. 17.

<sup>82</sup> Vgl. ebd.; vgl. Lindner 2005, S. 1.

<sup>83</sup> Vgl. Arnheim 1979, S. 9; vgl. Ernst 2012b, S. 25; Anm.: „Zeit als wahrgenommene wie als Vollzug ist die Funktion von Gedächtnissen in Rückkopplung mit einem Prozeß, neuronal wie technologisch.“ (Ebd.).

<sup>84</sup> Ebd., S. 18.

<sup>85</sup> Vgl. ebd., S. 25, 27; vgl. Whitehead 1919, S. 4; vgl. Heidegger 1953, S. 417, 425f.

<sup>86</sup> Ernst 2012b, S. 27.

<sup>87</sup> Hansen 2011, S. 372.

physikalische (insbesondere elektrische) Größen (Strom, Spannung, Feldstärke)“<sup>88</sup> definieren. Oder kurz gesagt: Die äußere Erscheinungsform der Information ist das Signal.<sup>89</sup> Damit ist – laut Ernst – Messmedientheorie auch immer Zeittheorie.<sup>90</sup>

Im Folgenden soll sich dem Messakt und der Repräsentation angenommen werden. Dabei wird sich zeigen, dass das repräsentierte Signal eine Eigenschaft definiert, die mit so etwas wie Welt verknüpft wird, da eine rekursive Verbindung zwischen Messapparat und Subjekt besteht.<sup>91</sup>

---

## Der Messakt & dessen Repräsentation

Der Philosoph Davis Baird unterscheidet in *Thing Knowledge* (2004) das Messinstrument von wissenschaftlichen Modellen und rein darbietenden Phänomendarstellungen (wie etwa Faradays Motor) durch die Eigenschaft, selbst in Vollzug zu treten und diesen zu repräsentieren.<sup>92</sup> Damit schließt diese Definition des Messinstruments auch Medien ein, die zeitkritische Prozesse mittels Speicherträger repräsentieren, wie etwa den speicherprogrammierten Digitalrechner und dessen performender  $\Sigma\Delta$ -ADC Schnittstelle oder die schwingende Membrane des Phonautograph, die sich in das Phonautogramm tanzt.<sup>93</sup> Auch wenn solche techn(olog)ischen Medien heutzutage eher selten mit dem Akt der Messung in Verbindung gebracht werden – oder zumindest dieser Aspekt wegen multipler Reizstimulation im Subjekt in Vergessenheit gerät –, fehlt es dem potenziellen Messinstrument meist nur noch an einer Fragestellung, um es wieder in den ‚Experimentiermodus‘ zu überführen.

Zentral für die physikalische Messung zeitkritischer Prozesse ist das techn(olog)ische Instrument, das als physikalisches Objekt selbst in der Welt, die es versucht repräsentativ zu ergreifen und dem Menschen als Extrakt zu vermitteln, existiert. Doch auch wenn das Messinstrument ‚objektiv‘ operiert, ist das übergeordnete Experiment durch die Auswahl an Apparatur und Anordnung voller Willkür, wie der Philosoph Edgar Wind hervorhebt:<sup>94</sup> „[D]er Physiker [kann] die Exaktheit eines Experiments nicht anders prüfen und begründen, als indem er die Gesetze, die ihm erprobt werden sollen, bereits als bekannt voraussetzt.“<sup>95</sup> Zwar bescheren die physikalischen Messungen der Menschheit physikalische Gesetze; die physikalische Gesetzmäßigkeit ist jedoch durch den vollziehenden Akt der Messung definiert.<sup>96</sup> Wind unterstellt deshalb dem

---

<sup>88</sup> Keller 2011, S. 4.

<sup>89</sup> Vgl. Richter 1985, S. 31.

<sup>90</sup> Vgl. Ernst 2012b, S. 18.

<sup>91</sup> Vgl. Barad 2007, S. 196.

<sup>92</sup> Vgl. Baird 2004, S. 5, 67f.

<sup>93</sup> Der Medienwissenschaftler Hartmut Winkler spricht in Bezug auf das computertechnologische Erfassen „reale[r] Vorgänge“ (Winkler 2016, S. 309), also dem Quantisieren, vom Messen. (Vgl. ebd.) Scott de Martinvilles Phonautograph wurde ab 1859 sogar mit einer Stimmgabel ausgestattet, um damit eine zusätzliche Spur, neben der via Trichter aufgenommenen, im Phonautogramm einzuzichnen, die als zeitliche Referenz der Untersuchung des Gemessenen diene. (Vgl. Feaster 2010, S. 45, 48f).

<sup>94</sup> Vgl. Wind 2001, S. 75.

<sup>95</sup> Ebd., S. 70.

<sup>96</sup> Vgl. ebd.

Experiment eine inhärente Vorahnung über den Ausgang des eigentlichen Messaktes, da im Grunde die Gesetze der klassischen bzw. newtonschen Physik auf der Annahme beruhen, dass gewählte Maßstäbe, also Bezugsgrößen, ihre Eigenschaft in der Zeit nicht verändern.<sup>97</sup> Die Krux dabei ist, dass die Exaktheit eines Experiments lediglich dann sichergestellt ist, wenn sich auf allgemeingültige Gesetze bezogen wird; ihre Allgemeingültigkeit hängt wiederum von den willkürlich gesetzten Bezugsgrößen ab, die die nachgewiesenen Gesetze ‚erden‘.<sup>98</sup> Somit findet ein Experiment zwar unter den angenommenen physikalischen Gesetzen statt, doch das repräsentierte Resultat bleibt in Bezug auf die Darstellung ein willkürliches, wenn auch zweckvolles, so Wind: „Sie [die Repräsentation] ist willkürlich, da sie einem physischen Objekt die Funktion auferlegt, ein metrisches Schema darzustellen. Sie ist zweckvoll: denn durch dieses Verfahren werden die physischen Koinzidenzen zwischen diesem Körper und anderen Körpern zu Anzeichen metrischer Entsprechungen.“<sup>99</sup> In Anlehnung an den Medienwissenschaftler Shintaro Miyazaki kann das Experiment als solches demzufolge als ein aus Subjekt und Objekt verschränktes, zeitkritisches Spektakel gesehen werden.<sup>100</sup>

Im Folgenden soll sich dem sogenannten Doppelspaltexperiment angenommen werden, um die hier beschriebene Verschränkung zwischen Subjekt und Messmedium zu verdeutlichen.<sup>101</sup> Aus der Skizzierung des Experiments wird hervorgehen, dass die Eigenschaft eines Objekts von Interesse, in diesem Fall das Licht, mit der Versuchsanordnung variiert, was jedoch in der newtonschen Physik einen starken Widerspruch hervorruft.<sup>102</sup> Es wird sich das „wave-particle duality paradox“<sup>103</sup> offenbaren, dem die klassische Physik Anfang des 20. Jahrhunderts gegenüber stand und welches zu einem in der Quantentheorie beschriebenen Umdenken des Messaktes als solchem führte.<sup>104</sup> Um die Besonderheit des Doppelspaltexperiments hervorheben zu können, wird zunächst die ‚klassische‘ Vorstellung des Lichts nach Newton skizziert.

Der Naturphilosoph und Mathematiker Sir Isaac Newton beschreibt in *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687) die experimentell offenbaren Naturgesetze als universell und somit als unabhängig vom weltprüfenden Messmedium:<sup>105</sup> „For since the

---

<sup>97</sup> Vgl. Wind 2001, S.70; vgl. Barad 2007, S. 110; Anm.: Vermutlich ist Sir Arthur Eddington einer der Ersten, der die Physik Newtons als klassisch bezeichnete: „I am not sure that the phrase ‚classical physics‘ has ever been closely defined. But the general idea is that the scheme of natural law developed by Newton in the *Principia* provided a pattern which all subsequent developments might be expected to follow.“ (Eddington 1927, S. 5).

<sup>98</sup> Vgl. Wind 2001, S.74f; Anm.: „[D]er Physiker, nach der Rechtmäßigkeit seines Verfahrens befragt, [kann] nur im Kreise argumentieren.“ (Ebd., S. 70).

<sup>99</sup> Ebd., S. 75.

<sup>100</sup> Vgl. Miyazaki 2020, S. 3; Anm.: Miyazaki nutzt das Konzept der ‚Ironie‘, um wissenschaftliche Gedanken losgelöst von möglichen Konflikten, die (zunächst) in eine argumentative Sackgasse führen würden, zu entwickeln, ohne im selbem Moment eine (Auf-)Lösung anbieten zu müssen. (Vgl. ebd., S. 1) Diese Herangehensweise lohnt sich vor allem bei der hier erwähnten eigensinnigen Subjekt-Objekt Verschränkung im Experiment bzw. Messakt.

<sup>101</sup> Vgl. Heisenberg 1979a, S. 61.

<sup>102</sup> Vgl. ebd., S. 50; vgl. Barad 2007, S. 76f; Anm.: Die Erkenntnisse aus dem Doppelspaltexperiment treffen nicht nur auf das elektromagnetische Licht zu, sondern ebenso auf mechanische Ereignisse, wie etwa in der Akustik. (Vgl. Frenkel 1934, S. 24; vgl. Pauli 1933, S. 87).

<sup>103</sup> Barad 2007, S. 83.

<sup>104</sup> Vgl. Ananthaswamy 2018, S. 16; vgl. Schenefeld 1998.

<sup>105</sup> Vgl. Eddington 1927, S. 4f; vgl. Ananthaswamy 2018, S. 16; vgl. Barad 2007, S. 107.



qualities of bodies are only known to us by experiments, we are to hold for universal all such as universally agree with experiments; and such as are not liable to diminution can never be quite taken away.“<sup>106</sup> Die auf Newtons *Principia* fußende Physik ist demnach – und laut der feministisch orientierten Wissenschaftsphilosophin sowie Physikerin Karen Barad – durch einen strikten Determinismus geprägt.<sup>107</sup> Der Physikerin zufolge lässt sich in Newtons Physik ein jedes physikalisches System vorhersagen und bestimmen: „Newton’s equations (i.e., the laws of classical mechanics) are acclaimed for their ability to predict and retrodict the physical state of a system for all time. According to Newtonian mechanics, the initial conditions can be determined by any one of a number of different measurement procedures.“<sup>108</sup>

Newton unterscheidet Licht von Schall, indem er davon ausgeht, dass sich Licht geradlinig ausbreitet; Schall hingegen pulsiert.<sup>109</sup> Geradlinig kann sich das Licht jedoch nur fortbewegen als Teilchen, welches laut dem Physiker Werner Heisenberg als Substanz auf ein sehr kleines Volumen beschränkt ist und sich dadurch von der pulsierenden Welle und ihrem Feld, das sich über einen großen Raum ausbreitet, unterscheidet.<sup>110</sup> Somit sind die Phänomene Welle und Teilchen grundverschieden, wie Barad hervorhebt:

It is important to keep in mind that waves are very different kinds of phenomena from particles. Classically speaking, particles are material entities, and each particle occupies a point in space at a given moment of time. Waves, on the other hand, are not things per se; rather, they are disturbances (which cannot be localized to a point) that propagate in a medium (like water) or as oscillating fields (like electromagnetic waves, the most familiar example being light). Unlike particles, waves can overlap at the same point in space.<sup>111</sup>

Da das Licht nach Newtons Auffassung aus „Korpuskeln genannten Teilchen“<sup>112</sup> besteht, sind Wellenphänomene in Bezug auf das Licht im Sinne einer klassischen

---

<sup>106</sup> Newton 1846 [Buch III], S. 384.

<sup>107</sup> Vgl. Barad 2007, S. 107.

<sup>108</sup> Barad 2007, S. 107.

<sup>109</sup> Vgl. Newton 1846 [Buch II], S. 368; Anm.: „[F]or since light is propagated in right lines, it is certain that it cannot consist in action alone [...]. As to sounds, since they arise from tremulous bodies, they can be nothing else but pulses of the air propagated through it [...].“ (Ebd.) Eine Unterscheidung zwischen Licht und ‚Sound‘ auf Basis der Eigenschaft macht mit Verweis auf Frenkel wenig Sinn, da beide die gleichen Phänomene ausbilden können. (Vgl. Frenkel 1934, S. 24; vgl. Pauli 1933, S. 83, 87).

<sup>110</sup> Vgl. Heisenberg 1979a, S. 48.

<sup>111</sup> Barad 2007, S. 76.

<sup>112</sup> Ananthaswamy 2018, S. 16.

Physik ausgeschlossen.<sup>113</sup> Kurz gesagt: Teilchen<sup>114</sup> sind Teilchen und Wellen sind Wellen; sie haben nichts gemeinsam; es geht nur ‚entweder-oder‘.<sup>115</sup>

Diese deterministische Vorstellung einer einzigen Eigenschaft bezüglich des Lichts gilt jedoch spätestens mit der Quantentheorie und dem Doppelspaltexperiment als widerlegt.<sup>116</sup> Beim Doppelspaltexperiment fällt laut dem Wissenschaftsjournalist Anil Ananthaswamy Licht auf zwei Öffnungen einer sonst lichtundurchlässigen Blende.<sup>117</sup> Hinter dieser befindet sich ein Detektor, wie etwa ein Fotoplatte. „Nach klassischer Sichtweise“, so Ananthaswamy, „sollten einzelne Teilchen, welche die Schlitzze passieren, hinter diesen auf den Detektor treffen und damit nach und nach zwei Hauptsignale verursachen. Das tun sie nicht. Vielmehr bilden sich auf dem Bildschirm abwechselnd helle und dunkle Streifen.“<sup>118</sup> Das auf der Fotoplatte provozierte Interferenzmuster widerlegt Newtons Teilchenvorstellung des Lichts, da nur Wellen diese Muster ausbilden.<sup>119</sup> „[D]iffraction patterns mark an important difference between waves and particles: according to classical physics, *only waves produce diffraction patterns; particles do not* (since they cannot occupy the same place at the same time)“<sup>120</sup> – so Barad.

Im Doppelspaltexperiment wird das Phänomen des Lichts als Interferenzmuster repräsentiert, woraus sich die Eigenschaft der wellenförmigen Ausbreitung ableiten lässt. Zum Paradoxon kommt es schließlich, wenn nur einer der beiden Spalte geöffnet ist: Anstelle eines Interferenzmusters bildet sich nun eine Gauß-Verteilung, ganz so, als

---

<sup>113</sup> Vgl. Ananthaswamy 2018, S. 13; vgl. Barad 2007, S. 97f; Anm.: „Nach der newtonschen Korpuskulartheorie muß man sich die Lichtstrahlen als Bahnen bestimmter Lichtkorpuskeln oder ‚Lichtatome‘ vorstellen. Diese Korpuskeln werden von dem leuchtenden Körper nach allen Richtungen ausgesandt und bewegen sich im leeren Raum oder in einem homogenen materiellen Medium geradlinig und gleichförmig [...]“ (Frenkel 1929, S. 3) Die Wellentheorie wird laut Frenkel dem Astronomen Christiaan Huygens angerechnet. (Vgl. ebd., S. 2). Während die Grundlage der Beschreibung der Lichtwelle durch James C. Maxwell gesetzt wurde, war es – weiter Frenkel – der Mut Albert Einsteins, die klassische Mechanik mit der Relativitätstheorie umzuformen, die durch die junge Quantentheorie und ihrer durch Max Planck aufgestellten Strahlungsformel sowie dem lichtelektrischem Effekt dazu gedrängt wurde. (Vgl. ebd., S. 5, 9).

<sup>114</sup> Laut Münster ist der Terminus Teilchen unspezifisch und wird neben Elektronen beispielsweise ebenso für Protonen verwendet. (Vgl. Münster 2020, S. 19).

<sup>115</sup> Vgl. Holzner 2013, S. 25.

<sup>116</sup> Vgl. ebd., S. 34; vgl. Barad 2007, S. 106f; vgl. Ananthaswamy 2018, S. 16.

<sup>117</sup> Vgl. ebd.; Anm.: In der Literatur wird der Physiker Thomas Young oft mit dem Doppelspaltexperiment in Verbindung gebracht. Demnach soll Young 1803 vor der Londoner Royal Society demonstriert haben, wie Licht, das durch zwei Schlitzze fällt, ein Interferenzmuster auf einer Fotoplatte erzeugt. (Vgl. ebd.). Allerdings macht Barad darauf aufmerksam, dass sich in Youngs *Lectures* von 1807 weder eine Erwähnung der Royal Society findet, noch eine Beschreibung, dass ein Doppelspaltexperiment durchgeführt wurde. (Vgl. Barad 2007, S. 99; vgl. Young 1807, S. 463f) Dementsprechend ist die Datierung der Demonstration bereits zu hinterfragen: Barad datiert Youngs Demonstration vor der Royal Society auf Juli 1802, während Ananthaswamy von November 1803 spricht. (Vgl. Barad 2007, S. 99; vgl. Ananthaswamy 2018, S. 16) Es gilt nun den Historiker\_innen, zu entscheiden, inwieweit hier tatsächlich von einem Beitrag Youngs gesprochen werden kann. Bis dahin müssen auch diskriminierende Kontexte, wie etwa patriarchale – um nur ein Beispiele zu nennen –, in Betracht gezogen werden, da kein eindeutiger Beweis besteht, jenes Experiment Young (allein) zuzuschreiben. (Vgl. Barad 2007, S. 99) Um die Verbreitung falscher Tatsachen zu vermeiden, wird sich dem in neuerer Literatur beschriebenen Konzept des Doppelspaltexperiments bedient. Ein historischer Hinweis wurde mit dieser Fußnote zumindest hinreichend unternommen.

<sup>118</sup> Ananthaswamy 2018, S. 16.

<sup>119</sup> Vgl. ebd.; Anm.: „The waves are said to interfere with each other, and the pattern created is called an interference or diffraction pattern.“ (Barad 2007, S. 77).

<sup>120</sup> Barad 2007, S. 81.

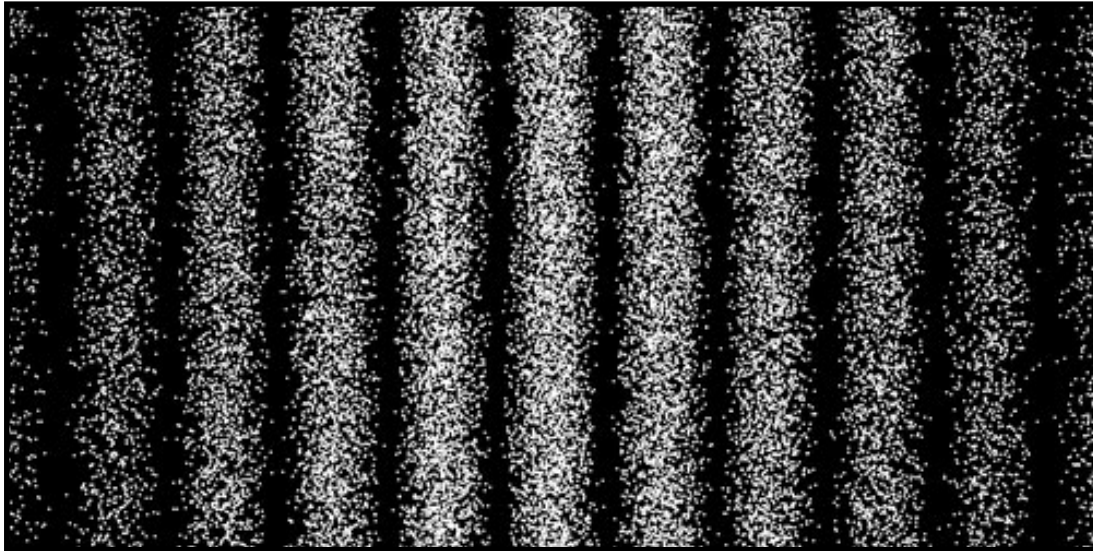


Abb. 2.: Quanteninterferenzbild (Eigenschaft von Welle und Teilchen in einem Bild).

würde man mit Schrotkugeln auf den Schlitz schießen.<sup>121</sup> Dieses Phänomen der Normalverteilung zeigt sich nur bei Teilchen, womit sich die Eigenschaft des Lichtes mit der Variation des Versuchsaufbaus geändert hat – ein ‚Unding‘ in der newtonschen Physik.<sup>122</sup> Im Folgenden wird eine Erklärung der beiden Phänomene angeboten, die die Verschränkung zwischen messendem Objekt und experimentierendem Subjekt verdeutlicht.

In der modernen Variante des Doppelspaltexperiments werden mittels Kathodenstrahler einzelne Elektronen auf die ‚Doppelspaltblende‘ geschossen.<sup>123</sup> Auch bei dem Teilchenbeschuss der zwei Spalten zeigt sich laut dem Physiker Gernot Münster weiterhin ein Interferenzmuster, doch dieses geht aus einzelnen Elektronen hervor: „Wenn die Intensität des Elektronenstrahls so weit verringert wird, dass immer nur einzelne Elektronen die Anordnung durchlaufen, kann man beobachten, dass das Interferenzmuster im Laufe der Zeit aus einzelnen Punkten aufgebaut wird. Jeder Punkt stammt von einem Elektron.“<sup>124</sup> Durch die punktförmige Lokalisation der Elektronen lässt sich ableiten, dass diese mit sich selbst interferieren und sich ihre Ladung nicht im Raum verteilt.<sup>125</sup> Oder anders ausgedrückt: Es scheint so, als würden sich die Elektronen wellenförmig auf den Detektor zubewegen.<sup>126</sup> Dies wäre jedoch nur möglich, wenn das Elektron sich durch beide Spalte auf einmal bewegt, wie Ananthaswamy deutlich macht:

Wenn die Berge einer Welle auf die Berge einer anderen treffen, führt das zur konstruktiven Interferenz (helle Bänder); falls sie auf Wellentäler stoßen, ist die Interferenz destruktiv (Dunkelheit). Hier aber läuft immer nur ein einziges

<sup>121</sup> Vgl. Münster 2020, S. 14.

<sup>122</sup> Vgl. ebd., S. 14ff.

<sup>123</sup> Vgl. ebd., S. 13f; vgl. Ananthaswamy 2018, S. 16.

<sup>124</sup> Münster 2020, S. 15.

<sup>125</sup> Vgl. ebd., S. 15f.

<sup>126</sup> Vgl. ebd., S. 16.

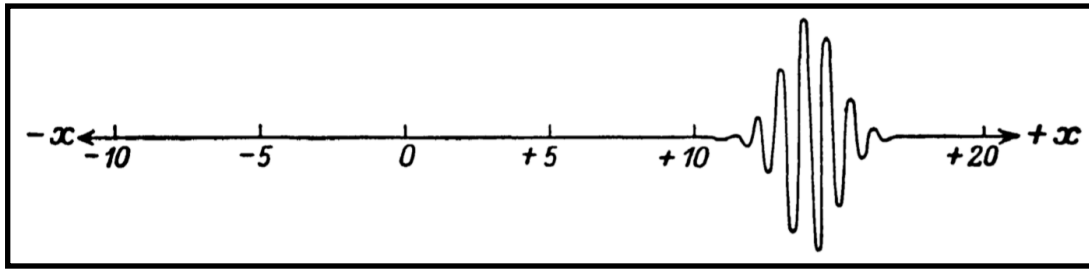


Abb. 3.: Erwin Schrödingers Darstellung eines oszillierenden Wellenpakets.

Photon<sup>127</sup> durch das Gerät, und es scheint darum so, als ob jedes Lichtteilchen beide Spalte auf einmal durchläuft und mit sich selber interferiert.<sup>128</sup>

Das beobachtete Phänomen lässt sich laut Münster mittels Wahrscheinlichkeitsinterpretation erläutern, welche Bestandteil der Kopenhagener Deutung ist.<sup>129</sup> Demnach verhalten sich die einzelnen Elektronen zunächst wellenförmig, treffen auf beide Spalte und bilden auf der Rückseite neue Wellen aus, die miteinander interferieren.<sup>130</sup> Dort wo die Intensität der Welle am stärksten ist, befinden sich schließlich auch die meisten Punkte auf dem Detektor, womit die Wahrscheinlichkeit für das Auftreffen des Elektrons auf dem Messschirm durch die Welle gegeben ist.<sup>131</sup> Dieses Verhalten der Teilchen wird schließlich durch die Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  ausgedrückt, die ebenso für die Ortsbestimmung der Elektronen auf dem Detektor maßgeblich ist.<sup>132</sup> Die Wellenfunktion gibt Auskunft über die räumliche Wahrscheinlichkeit für das Auffinden eines Elektrons,<sup>133</sup> welches sich in der Repräsentation des Gemessenen anhand der Teilchendichte, der Intensität, widerspiegelt, so Ananthaswamy: „Die Messung – in dem Fall die Wechselwirkung mit der fotografischen Platte – lässt die Wellenfunktion kollabieren, wie es im Sprachgebrauch der Quantenmechanik heißt. Während sie zuvor noch über den gesamten Raum ausgebreitet war, erhält sie im Moment der Messung dort ein Maximum, wo sich das Photon offenbart.“<sup>134</sup> Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation ermöglicht es demnach, anhand der Wahrscheinlichkeitsdichte, der möglichen Intensität, Erwartungswerte zu bilden, also Werte, die zunächst noch unbekannt sind.<sup>135</sup>

<sup>127</sup> Ein Photon kann sich im Sinne Erwin Schrödingers als eine Art ‚Wellenpaket‘ (Abb. 3) vorgestellt werden; (vgl. Frenkel 1929, S. 33) eine unteilbare Energieeinheit, die nicht zerfließt: „Our wave group always remains compact, and does not spread out into larger regions as time goes on [...]“ (Schrödinger 1928, S. 44). Das Equivalent zum Photon ist das durch Frenkel 1934 beschriebene Phonon, welches auch Schall als quantisiertes Wellenpaket beschreibt und 2019 durch Arrangoiz-Arriola *et al.* experimentell bewiesen werden konnte. (Vgl. Frenke 1934, S. 24; vgl. Arrangoiz-Arriola *et al.* 2019). Photon und Phonon sind demnach physikalische Objekte, die für sich genommen noch keine Information – im Sinne einer Ordnung – übermitteln und damit nicht mit einem Signal gleichzusetzen sind.

<sup>128</sup> Ananthaswamy 2018, S. 16.

<sup>129</sup> Münster 2020, S. 16, 19.

<sup>130</sup> Vgl. Ananthaswamy 2018, S. 16.

<sup>131</sup> Vgl. Münster 2020, S. 16.

<sup>132</sup> Vgl. ebd.

<sup>133</sup> Vgl. ebd., S. 18; vgl. Eidenmüller 2015, S. 5.

<sup>134</sup> Ananthaswamy 2018, S. 16.

<sup>135</sup> Vgl. Münster 2020, S. 19; vgl. Rubinowicz 1933, S. 17.

Messen artet hier zu einem statistischen Spiel aus,<sup>136</sup> was im zweiten Kapitel von zentraler Bedeutung ist.

Nichtsdestotrotz ist die Frage nach der Eigenschaft des Lichts noch nicht geklärt. Was ist es denn nun, Welle oder Teilchen? Ließe sich nur der Weg des Teilchens, den es durch den einen oder den anderen Spalt geht, durch Beschuss mit  $\gamma$ -Strahlen hinter einem der beiden Spalte bestimmen, dann wäre eine Distanzierung der Welle denkbar.<sup>137</sup> Dieses Gedankenexperiment<sup>138</sup> geht zurück auf den Physiker Richard Feynman und wurde 1995 durch Chapman *et al.* in Vollzug gesetzt.<sup>139</sup> Zwar ließ sich bestimmen, durch welchen Spalt das Elektron ging, doch erlosch im gleichen Moment das Interferenzmuster und zeigte stattdessen eine Gauß-Verteilung.<sup>140</sup> Die Eigenschaft des Lichtes hat sich unter dieser ‚neuen‘ Versuchsanordnung geändert; das Messinstrument tritt mit seiner Umwelt in anderer Weise in Kontakt, was die Repräsentation von so etwas wie Welt ‚natürlich‘ beeinflusst.<sup>141</sup> Dies festigte nur die 1995 bereits allgegenwärtige Theorie des Welle-Teilchen-Dualismus: „Ein Elektron ist weder Welle noch Teilchen. Es ist ein physikalisches Objekt, welches Welleneigenschaften als auch Teilcheneigenschaften zeigen kann. In welcher Weise es sich zeigt, hängt von der experimentellen Situation ab.“<sup>142</sup>

Der hier anhand des Doppelspaltexperiments abgeleitete Welle-Teilchen-Dualismus stellte in der klassischen Physik Anfang des 20. Jahrhunderts eine Herausforderung für die Beschreibung der Lichteigenschaft dar, da sich das beobachtete Naturphänomen mit den entsprechenden Änderungen im Messmedium respektive -anordnung ändert, so Barad.<sup>143</sup> Die damals noch junge Quantentheorie bietet durch die Wellenfunktion bis heute eine Erklärung für die Doppelnatur des Lichts sowie des Sounds an und ermöglicht es schließlich, anhand der Welle das Teilchen zu beschreiben, welches sich laut dem Physiker Andreas Müller als Wolf entpuppt, der manchmal im Schafspelz

---

<sup>136</sup> Vgl. Eichhorn & Wetterich 2019, S. 14.

<sup>137</sup> Vgl. Münster 2020, S. 18.

<sup>138</sup> Die grundlegende Idee hinter dem Gedankenexperiment ist, sich mit prinzipiell möglichen Experimenten – die jedoch nur in ‚Gedanken‘ getätigt werden – Aufschluss über kritisch betrachtete, quantenphysikalische Phänomene zu machen. (Vgl. Heisenberg 1979b, S. 11) Eins der womöglich Bekanntesten ist das Gedankenexperiment ‚Schrödingers Katze‘, welches laut Alexander Firyn Heisenbergs Unschärferelation in Verruf bringen sollte und stattdessen bis heute für eben das, was es kritisiert, entsteht. (Vgl. Firyn 2009, S. 306).

<sup>139</sup> Vgl. Chapman *et al.* 1995, S. 3783.

<sup>140</sup> Vgl. Münster 2020, S. 18f.

<sup>141</sup> Vgl. Barad 2007, S. 128.

<sup>142</sup> Münster 2020, S. 19.

<sup>143</sup> Vgl. Barad 2007, S. 106.

daher kommt und manchmal nicht.<sup>144</sup> Mit dem als Photon bzw. Phonon bezeichneten, oszillierenden Wellenpaket wird schließlich auch die „Punktförmigkeit“<sup>145</sup> hinfällig.<sup>146</sup>

Die unabhängige Allgemeingültigkeit eines beobachteten Phänomens wurde durch den in Vollzug gesetzten Messapparat einkassiert, denn das techn(olog)ische Messmedium ist als operierendes Naturspektakel immer selbst Teil dessen, was es misst.<sup>147</sup> „It reminds us once again that the world of physics is a world contemplated from within surveyed by appliances which are part of it and subject to its laws“<sup>148</sup> – so der Physiker Sir Arthur Eddington in *The Nature of the Physical World* (1927). Folglich ist jedes Messgerät auch immer Ausdruck von so etwas wie Welt, wie der Physiker Niels Bohr hervorhebt:

Kein Ergebnis eines [...] Experiments kann dahin gedeutet werden, dass es Aufschluss über unabhängige Eigenschaften der Objekte gibt; es ist vielmehr unlöslich mit einer bestimmten Situation verbunden, in deren Beschreibung auch die mit den Objekten in Wechselwirkung stehenden Messgeräte als wesentliches Glied eingehen.<sup>149</sup>

Das, was beobachtet wird, ist im Sinne Heisenbergs immer einer Fragestellung ausgesetzt, deren Antwort laut Ernst im Messmedium schlummert und durch das Öffnen der ‚Blackbox‘ offenbart werden will.<sup>150</sup> Folglich ist mit der Wahl des Apparats durch das Subjekt bereits eine Entscheidung über so etwas wie Welt getroffen. Dies wird im nächsten Kapitel vertieft und führt zur Doppelnatur des sonischen Signals hin. Die in der Quantentheorie herausgearbeiteten Episteme dienen dabei als medienwissenschaftlicher Detektor (lat. *dētēctor* = Offenbarer), anhand dessen sich – durch die techn(olog)ische Funktionsweise des Messmediums – die Eigenschaft des sonischen Signal ableiten lässt.

---

<sup>144</sup> Vgl. Müller *Lexikon der Astronomie* (2007–2014); vgl. Arrangoiz-Arriola *et al.* 2019; Vgl. Fischer 2019.

<sup>145</sup> Müller *Lexikon der Astronomie* (2007–2014).

<sup>146</sup> Vgl. ebd.; vgl. Frenkel 1929, S. 33; vgl. Frenkel 1934, S. 24; vgl. Schrödinger 1928, S. 44; Anm.: Die De-Broglie-Bohm-Theorie geht davon aus, dass Photonen definierte Bahnen besitzen, auf denen sie sich bewegen. „Es reitet auf einer führenden Welle, die durch beide Schlitze geht und das Lichtteilchen zu einem Ort der konstruktiven Interferenz leitet.“ (Ananthaswamy 2018, S. 17) Auch wenn dies laut Ananthaswamy eine „deterministische Alternative zur Standardquantenmechanik“ (ebd., S. 19) ist, entspricht das Ergebnis auf dem Detektor dem der kanonischen Quantenmechanik. (Vgl. ebd.). Weiterhin ist das beobachtete Phänomen abhängig vom Messmedium im Sinne Bohrs. (Vgl. Niels Bohr zitiert in: Münster 2020, S. 19).

<sup>147</sup> Vgl. Wheeler 1983, S. 184f.

<sup>148</sup> Eddington 1927, S. 225.

<sup>149</sup> Niels Bohr zitiert in: Münster 2020, S. 19.

<sup>150</sup> Vgl. Heisenberg 1979a, S. 60; vgl. Ernst 2004a, S. 3

# ENTSCHEIDUNG

---

## Eine medienwissenschaftliche Deutung der Quantentheorie

Der Physiker Niels Bohr vertrat die Ansicht, dass die Beschreibung von so etwas wie Welt mittels Quantentheorie lediglich dann erfolgen kann, wenn ein Phänomen überhaupt erst beobachtet wurde: „No elementary phenomenon is a phenomenon until it is a registered (observed) phenomenon.“<sup>151</sup> Dieses Phänomen ist Bohrs Auffassung zufolge mit dem Messgerät verschränkt; das techn(olog)ische Gerät muss somit auch immer als Teil des Phänomens betrachtet werden.<sup>152</sup> Dieser Meinung schließt sich der theoretische Physiker John Wheeler an, dessen als „Antirealismus“<sup>153</sup> bezeichnete philosophische Position sogar einen Schritt weiter geht, indem sie besagt, dass elementare Quantenphänomene erst im Moment der Beobachtung real werden.<sup>154</sup> Die Verschränkung zwischen Messsystem und Phänomen widersprach wiederum der Ansicht des Physikers Albert Einsteins, dessen Relativitätstheorie laut den theoretischen Physiker\_innen Astrid Eichhorn und Christof Wetterich eine klassische Feldtheorie darstellt.<sup>155</sup> Zwischen Einstein und Bohr entfachte eine Debatte, die im Kern das Verständnis der durch physikalische Messung hervorgebrachten Welt diskutierte: „[...] Einstein tried to show that quantum theory – in making what happens depend upon

---

<sup>151</sup> Niels Bohr zitiert in: Wheeler 1983, S. 184.

<sup>152</sup> Vgl. Barad 2007, S. 199.

<sup>153</sup> Ananthaswamy 2018, S. 13.

<sup>154</sup> Vgl. ebd.; Anm.: Hier muss hinterfragt werden, was mit dem Terminus des Realen gemeint ist. Im Sinne des Psychoanalytikers Jacques Lacan entspricht das Beobachtete weniger dem Realen als vielmehr einem „symbolischen Spielchen, auf das sich das System von Newton und das von Einstein“ – aber auch das der Quantentheorie – „resümieren“ (Lacan 1991, S. 379), was jedoch wenig mit dem Realen an sich zu tun hat. (Vgl. ebd.).

<sup>155</sup> Vgl. Einstein 2009, S. 6f; vgl. Eichhorn & Wetterich 2019, S. 14.

what the observer chooses to measure – is incompatible with any reasonable idea of reality. Bohr's reply briefly summarized was this: Your concept of reality is too limited."<sup>156</sup>

Während die Relativitätstheorie auf festen Werten bzgl. der Beobachtungsgrößen fußt, schwanken in der Quantenphysik die Werte um einen statistischen Mittelwert.<sup>157</sup> Selbst wenn man in der Quantenphysik ein Experiment unter den gleichen Voraussetzungen durchführt, sind die *ermittelten* Werte – im Sinne einer statistischen Mittelwertbildung – nie dieselben.<sup>158</sup> Die einzelnen Werte gehen laut Werner Heisenberg aus den Beobachtungen hervor; der messtechnische Vollzug und dessen Repräsentation legt die „Eigenschaft des Systems“<sup>159</sup> fest und ein statistisch ermitteltes Ergebnis nähert sich dem tatsächlich stattgefundenen Ereignis am Wahrscheinlichsten an.<sup>160</sup> „Der Unterschied zwischen klassischer und Quantenmechanik besteht vielmehr darin: Klassisch können wir uns durch vorausgehende Experimente immer die Phase<sup>161</sup> bestimmt denken. In Wirklichkeit ist dies aber unmöglich, weil jedes Experiment zur Bestimmung der Phase das Atom zerstört bzw. verändert“<sup>162</sup> – so Heisenberg.

In diesem Teil der Arbeit findet eine medienwissenschaftliche Deutung der Quantentheorie statt, soll sagen, dem Messgerät wird eine eigene Darbietungs- sowie Darstellungsform von ‚Natur‘ zugesprochen, die in ihrer medientechn(olog)ischen Anatomie verkörpert ist. Während es zuvor um den Messakt als solchen ging, soll sich nun dessen Erzeugnis angenommen werden, also ‚Wie wird *was* gemessen?‘.

In der klassischen, deterministischen Physik – also auch in der Relativitätstheorie – lassen sich Objekte jeglicher Art durch deren Impuls und Ort definieren.<sup>163</sup> Norbert Wiener macht jedoch darauf aufmerksam, dass das gleichzeitige Messen des Impulses und des Ortes nur in einem äußerst groben Maßstab seine Richtigkeit behält:

Die Größen, die die klassische Physik für eine Kenntnis des gesamten Verlaufes eines Systems verlangt, sind nicht gleichzeitig beobachtbar, außer auf eine grobe und angenäherte Art, die nichtsdestoweniger für die Anforderung der klassischen Physik *in dem Bereich, in dem sie experimentell als anwendbar erwiesen wurde, hinreichend genau ist*. Die Bedingungen für die genaue Beobachtung eines Impulses und der korrespondierenden Lagekoordinaten sind unvereinbar miteinander.<sup>164</sup>

---

<sup>156</sup> Wheeler 1983, S. 182.

<sup>157</sup> Vgl. Einstein 2009, S. 8f, 17; vgl. Eichhorn & Wetterich 2019, S. 14.

<sup>158</sup> Vgl. ebd.

<sup>159</sup> Heisenberg 1979a, S. 45; Anm.: Aus den Schriften Heisenbergs wird nicht ersichtlich, was mit ‚System‘ genau gemeint ist. Im Sinne Kellers ist ein System „ein an der Wirklichkeit orientiertes mathematisches Modell, welches zur Darstellung von Signalen geeignet ist.“ (Keller 2011, S. 4).

<sup>160</sup> Vgl. Heisenberg 1979a, S. 45f; vgl. Eichhorn & Wetterich 2019, S. 14; vgl. Holzner 2013, S. 35.

<sup>161</sup> Gareth Loy beschreibt Phase als „characteristic points reached periodically each time a wave repeats.“ (Loy 2006, S. 140). Laut dem Physiker Wolfgang Pauli ist die Phase nie direkt beobachtbar: „Diese Funktionen  $\psi(x, t)$  und  $\phi(p)$  – man nennt sie oft ‚Wahrscheinlichkeitsamplituden‘ – sind aber, was ihre Phase betrifft, *nicht direkt beobachtbar*; dies gilt vielmehr nur von den Wahrscheinlichkeitsdichten  $W(x, t)$  und  $W(p)$ . Die komplexe Wellenfunktion selber hat somit einen nur symbolischen Charakter und dient dazu, den Zusammenhang zwischen  $W(x, t)$  und  $W(p)$  zu vermitteln.“ (Pauli 1933, S. 98).

<sup>162</sup> Heisenberg 1927, S. 177.

<sup>163</sup> Vgl. Holzner 2013, S. 34.

<sup>164</sup> Wiener 1968, S. 122f.



Die klassische Physik ist demnach völlig ausreichend um Phänomene bis zu einer gewissen Größenordnung zu erklären. Doch das Doppelspaltexperiment verdeutlichte bereits, dass jene Physik schlichtweg überfordert ist, was die Beschreibung der ‚Natur‘ eines kleineren Größenverhältnisses betrifft.<sup>165</sup>

Eichhorn und Wetterich erläutern den Zusammenhang zwischen Messung und Größenordnung anhand zweier Beispiele: Das Erste erklärt den Messakt der deterministischen Physik Newtons anhand einer Gebirgslandschaft, „[d]eren Höhe an einem Ort und Zeitpunkt [...] im Prinzip beliebig genau heraus[zu]finden [ist].“<sup>166</sup> Different verhält es sich im Beispiel der Beschreibung der quantenphysikalischen Messung. Diesmal soll die Höhe der Meeresoberfläche via Satellit gemessen werden. Hierbei handelt es sich um eine fluktuierende Beobachtungsgröße, die sich aufgrund der „begrenzten Auflösung über Bereiche in Zeit und Raum“<sup>167</sup> nur *ermitteln* lässt.<sup>168</sup> „Die Wellen sind Fluktuationen um diese Mittelwerte. Wir können auch die mittlere Höhe der Wellen bestimmen, doch den genauen Wert an einem bestimmten Punkt kennen wir nicht. In der Quantenmechanik ist das ähnlich – hier aber keine Frage der praktischen Messgenauigkeit mehr, sondern eine intrinsische Unschärfe der Natur.“<sup>169</sup>

Die hier erwähnte ‚Unschärfe der Natur‘ ist eine durch Heisenberg beschriebene Gesetzmäßigkeit, um die es im Folgenden explizit gehen soll.<sup>170</sup> Im Grunde besagt die sogenannte Unbestimmtheitsrelation – oder auch „Unbestimmtheitsprinzip“<sup>171</sup> –, dass ein Phänomen nur via Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben werden kann, da die Beobachtungsgrößen um einen Mittelwert schwanken, welcher als raumzeitliche Relation zur Repräsentation von so etwas wie Welt führt.<sup>172</sup> „Auf diese Weise wandelt die Quantenphysik die Frage nach Ort und Impuls in Wahrscheinlichkeiten um“<sup>173</sup> – so

---

<sup>165</sup> In der Literatur findet sich immer wieder der Kurzschluss zwischen Quantentheorie und mikroskopischer Welt oder newtonscher Physik und makroskopischer Welt. (Vgl. Holzner 2003, S. 25; vgl. Eichhorn & Wetterich 2019, S. 19) Da die Begrifflichkeiten laut Erich J. Schenefeld eher problematisch sind, wird in dieser Arbeit – wenn möglich – auf die Verwendung von Makro- und Mikrowelt verzichtet. (Vgl. Schenefeld 1998) Des Weiteren verweist Barad darauf, dass die Einteilung von grösentechnischen Hoheitsgebieten innerhalb der Physik ungeeignet ist, da die Quantenphysik auch Phänomene innerhalb der ‚Makrowelt‘ beschreibt. (Vgl. Barad 2007, S. 110).

<sup>166</sup> Eichhorn & Wetterich 2019, S. 14.

<sup>167</sup> Ebd.

<sup>168</sup> Vgl. ebd.

<sup>169</sup> Ebd.

<sup>170</sup> Vgl. Münster 2020, S. 28; Anm.: Laut Münster hat Heisenberg es vorgezogen von der ‚Unbestimmtheitsrelation‘ zu sprechen, da das Teilchen selbst nicht ‚unscharf‘ sein kann, sondern nur dessen Ort oder Impuls. (Vgl. ebd., S. 29).

<sup>171</sup> Pauli 1933, S. 83.

<sup>172</sup> Vgl. Heisenberg 1979b, S. 20; vgl. Heisenberg 1979a, S. 43; vgl. Eichhorn & Wetterich 2019, S. 14; vgl. Holzner 2013, S. 34; Anm.: Heisenberg beschreibt die Wahrscheinlichkeitsfunktion als eine Mischung aus zwei Elementen: Der Tatsache selbst und dem Grad der Kenntnis einer Tatsache. (Vgl. Heisenberg 1979a, S. 43) „Sie [die Wahrscheinlichkeitsfunktion] stellt ein Faktum, d.h. eine Tatsache dar, insoweit sie der Ausgangssituation die Wahrscheinlichkeit 1, d.h. vollständige Sicherheit, zuschreibt. Es ist völlig sicher, daß das Elektron sich an dem beobachteten Ort mit der beobachteten Geschwindigkeit bewegt hat. Beobachtet heißt dabei allerdings, beobachtet innerhalb der Genauigkeit des Experiments. Sie stellt den Grad unserer Kenntnis dar, insofern ein anderer Beobachter vielleicht die Lage des Elektrons noch genauer hätte kennen können.“ (Ebd., S. 43f).

<sup>173</sup> Holzner 2013, S. 35.

der Physiker Steven Holzner. Diese „statistische Deutung“<sup>174</sup> ist jedoch keineswegs als ein durch den Messapparat erzeugtes, defizitäres Abbild zu verstehen. Im Anschluss wird deshalb anhand der Skizzierung des Unbestimmtheitsprinzips gezeigt, dass mit unterschiedlichem Messgerät ebenso eine differente Facette von Natur einhergeht.

Bei dem Unbestimmtheitsprinzip Heisenbergs handelt es sich um eine 1927 aufgestellte Gesetzmäßigkeit, die der dem Teilchen inhärenten Wellencharakteristik geschuldet ist,<sup>175</sup> weshalb „kanonisch konjugierte Größen (wie Ort  $q$  und Impuls  $p$ ) nicht gleichzeitig und mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden können.“<sup>176</sup> Zurückzuführen ist Heisenbergs Gesetzmäßigkeit auf die Tatsache, dass die Geschwindigkeit eines Objektes immer nur in einem gewissen Zeitraum gemessen werden kann, „der größer als aktual unendlich null ist.“<sup>177</sup> Folglich verändert sich der Standort des zu messenden Objekts zeitkritisch, weshalb die exakte Bestimmung des Standorts nie gegeben ist:<sup>178</sup>

Man konnte zwar über den Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons sprechen wie in der Newtonschen Mechanik, man konnte die Größen auch beobachten und messen. Aber man konnte nicht beide Größen gleichzeitig mit einer beliebigen Genauigkeit bestimmen. Es ergab sich, daß das Produkt dieser beiden Ungenauigkeiten nicht kleiner gemacht werden konnte als die Plancksche Konstante, geteilt durch die Masse des Teilchens, um das es sich dabei handelte. [...] Sie werden Unsicherheitsrelationen oder das Prinzip der Unbestimmtheit genannt. Man hatte damit gelernt, daß die alten Begriffe nur ungenau auf die Natur passen.<sup>179</sup>

Mit der Messgenauigkeit des einen steigt die Messungenauigkeit des anderen, wobei die Ungenauigkeit als solche nie kleiner als das ‚Plancksche Wirkungsquantum‘<sup>180</sup> werden kann.<sup>181</sup> Da durch das Doppelspaltexperiment die Kenntnis des sich im Raum bewegenden Wellenpakets (bzw. der Wellenfunktion) besteht, besagt Heisenbergs Prinzip der Unbestimmtheit außerdem, dass sich die ‚Verortung‘ einer solchen unteilbaren Energieeinheit aus den weltlichen Prozessen heraus ergibt und sich ihr deshalb immer nur statistisch angenähert werden kann.<sup>182</sup> Nichtsdestotrotz ist die durch die Unbestimmtheitsrelation erwähnte Unsicherheit weniger eine Frage der

---

<sup>174</sup> Neumann 1996, S. 109; Anm.: „Diese Auffassung der Quantenmechanik, die ihre statistischen Aussagen als die wirkliche Form der Naturgesetze anerkennt und das Prinzip der Kausalität aufgibt, ist die sog. statistische Deutung.“ (Ebd.).

<sup>175</sup> Vgl. Heisenberg 1927, S. 174f; vgl. Holzner 2013, S. 35; vgl. Münster 2020, S. 28.

<sup>176</sup> „Heisenbergsche Unschärferelation“ in *Lexikon der Physik* 1998.

<sup>177</sup> Firyn 2009, S. 304.

<sup>178</sup> Vgl. Heisenberg 1927, S. 175.

<sup>179</sup> Heisenberg 1979b, S. 20; Anm.: Mathematisch ausgedrückt lautet die Unbestimmtheitsrelation für  $p$  und  $q$  wie folgt:  $\Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ . Gleiches gilt für Energie und Zeit:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ . (Vgl. Münster 2020, S. 28; vgl. Völz 2020, S. 14; vgl. „Heisenbergsche Unschärferelation“ in *Lexikon der Physik* 1998).

<sup>180</sup> Laut Rubinowicz ist das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  „das Wahrzeichen der Quantentheorie überhaupt“ (Rubinowicz 1933, S. 2) und beträgt  $6,6256 \cdot 10^{-34}$  Js. (Vgl. Holzner 2013, S. 28.) Es gilt heute als eine Naturkonstante. (Vgl. Rubinowicz, S. 2; vgl. Münster 2020, S. 1; vgl. „Plancksches Wirkungsquantum“ in *Lexikon der Physik* 1998).

<sup>181</sup> Vgl. Firyn 2009, S. 305; vgl. Heisenberg 1979a, S. 43f; vgl. Kayser 2015, S. 61.

<sup>182</sup> Vgl. Heisenberg 1979a, S. 46, 55; vgl. Firyn 2009, S. 305; vgl. Rubinowicz 1933, S. 17; vgl. Pauli 1933, S. 98; vgl. Barad 2007, 76; vgl. Gabor 1947, S. 591f.

Messungenauigkeit, als vielmehr eine in der Natur existierende Gesetzmäßigkeit, so Heisenberg:

Da nun der statistische Charakter der Quantentheorie so eng an die Ungenauigkeit aller Wahrnehmung geknüpft ist, könnte man zu der Vermutung verleitet werden, daß sich hinter der wahrgenommenen statistischen Welt noch eine „wirkliche“ Welt verberge, in der das Kausalgesetz gilt. Aber solche Spekulationen scheinen uns, das betonen wir ausdrücklich, unfruchtbar und sinnlos. Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben. Vielmehr kann man den wahren Sachverhalt viel besser so charakterisieren: Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik und damit der Gleichung (1)<sup>183</sup> unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.<sup>184</sup>

Nichtsdestotrotz spricht der Physiker Wolfgang Pauli bei der ‚quantenphysikalischen Messung‘<sup>185</sup> von einem „Verzicht auf die eindeutige Objektivierbarkeit der Naturvorgänge, d. h. auf die klassische raum-zeitliche und kausale Naturbeschreibung, die wesentlich auf der eindeutigen Trennbarkeit von Erscheinung und Beobachtungsmittel beruht.“<sup>186</sup> Die durch Pauli beschriebene Objektivität basiert auf dem Konzept der klassischen Physik, in der Messmedium und Phänomen kompromisslos getrennt voneinander aufgeführt werden. Diese Trennung existiert im Sinne Bohrs in der Quantenphysik jedoch nicht; trotzdem besteht Heisenberg auch hier auf Objektivität, da diese moderne Auffassung der Physik sich ebenso in klassischer Weise auszudrücken vermag: „Diese Unsicherheit kann man objektiv nennen, insofern sie ja einfach die Folge davon sind, daß wir das Experiment in den Begriffen der klassischen Physik beschreiben; sie hängen in den Einzelheiten nicht vom Beobachter ab. Man kann sie subjektiv nennen, insofern sie unsere unvollständige Kenntnis der Welt bezeichnen.“<sup>187</sup> Es ließe sich somit behaupten, dass die klassische Physik so etwas wie Welt idealisiert, während in der Quantenphysik die wahrscheinlichste Version von so etwas wie Welt aus Beobachtungen ebenjener hervorgeht.<sup>188</sup>

Im Folgenden soll sich explizit der Impuls- sowie Ortsmessung im Sinne der Quantenphysik gewidmet werden, die im Allgemeinen – und in den Worten Holzners – die Wellenfunktion nutzt, „deren Quadrat [wiederum] die *Wahrscheinlichkeitsdichte*

---

<sup>183</sup>  $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$  (Heisenberg 1927, S. 173).

<sup>184</sup> Heisenberg 1927, S. 197.

<sup>185</sup> Es muss hervorgehoben werden, dass es laut Ananthaswamy nicht klar ist, was in der Quantentheorie mit Messung gemeint ist: „Sie postuliert einfach, das dafür verwendete Gerät müsse aus der klassischen Welt stammen, ohne eine Grenze zwischen dieser und dem Quantenreich zu definieren.“ (Ananthaswamy 2018, S. 17).

<sup>186</sup> Pauli 1933, S. 83.

<sup>187</sup> Heisenberg 1979a, S. 55; Anm.: Es ist eben der Tatsache geschuldet, dass die Natur vor dem Menschen war; der Mensch jedoch vor der Wissenschaft, die die Natur versucht zu beschreiben. (Vgl. Weizsäcker zitiert in: ebd., S. 59) „Der erste Teil des Satzes rechtfertigt die klassische Physik mit ihrem Ideal der vollständigen Objektivität. Der zweite Teil erklärt uns, warum wir dem Paradox der Quantentheorie nicht entgehen können; warum wir nämlich nicht der Notwendigkeit entgehen können, die klassischen Begriffe zu verwenden.“ (Heisenberg 1979a, S. 58f).

<sup>188</sup> Vgl. ebd., S. 56f; vgl. Ernst 2012a, S. 403; vgl. Neumann 1996, S. 4; Holzner 2013, S. 25; Anm.: „Man kann sagen, daß die klassische Physik eben die Idealisierung der Welt darstellt, in der wir über die Welt oder über ihre Teile sprechen, ohne dabei auf uns selbst Bezug zu nehmen.“ (Heisenberg 1979a, S. 57).

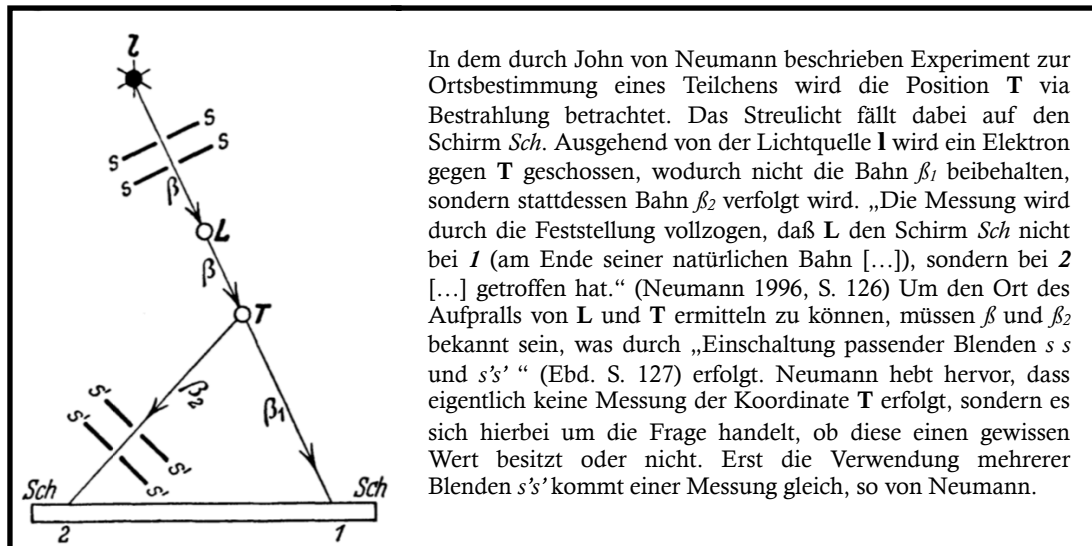


Abb. 4.: Ortsbestimmung eines Teilchens im Sinne John von Neumanns.

angibt“ und besagt, „dass ein Teilchen sich an einem bestimmten Ort befindet oder einen bestimmten Impuls besitzt.“<sup>189</sup> Oder anders ausgedrückt: Die Wahrscheinlichkeit „ein Teilchen zur Zeit  $t$  in einem Volumenelement am Ort“<sup>190</sup>  $\vec{r}$  anzutreffen wird mathematisch  $|\psi(\vec{r}, t)|^2 d^3r$  ausgedrückt.<sup>191</sup> Anhand der unterschiedlichen Messkonzepte lässt sich die zentrale Rolle des medientechn(olog)ischen Messinstruments ableiten, dessen unterschiedliche Anatomien – im Sinne eines in gewisser Weise strukturierten Körpers – die Untersuchung der Doppelnatur des sonischen Signals überhaupt erst legitimiert. Zunächst soll nun mit der Impulsmessung begonnen werden.

Die Impulsmessung erfolgt im Grunde ähnlich der Bestimmung der Geschwindigkeit in der newtonschen Physik.<sup>192</sup> Der Ort des Teilchens  $T$  wird zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten, beispielsweise  $0$  und  $t$ , gemessen und durch  $t$  dividiert.<sup>193</sup> „Dabei muß jedoch die Geschwindigkeit im Zeitintervalle  $0, t$  konstant sein; ändert sie sich, so ist diese Änderung ein Maß für die Abweichung zwischen der soeben berechneten mittleren Geschwindigkeit und der wirklichen Geschwindigkeit (etwa im Augenblick  $t$ ), d. h. für die Meßunbestimmtheit – dasselbe gilt für den Impuls.“<sup>194</sup> Folglich – und im Sinne Einsteins – geht die Bestimmung des Impuls bzw. der Geschwindigkeit immer aus der Bewegung eines Objektes in der Zeit hervor.<sup>195</sup>

Im Gegensatz dazu lässt sich der Ort eines Teilchen wegen der ‚Unschärfe der Natur‘ lediglich durch die Intensität *ermitteln*, da die messende Apparatur von ‚innen heraus‘

<sup>189</sup> Holzner 2013, S. 35.

<sup>190</sup> Ebd.

<sup>191</sup> Vgl. ebd.; vgl. Münster 2020, S. 16; Anm.: Mit  $\vec{r}$  ist neben dem zahlenmäßigen Betrag auch eine Richtung gegeben, da es sich hierbei um einen Vektor handelt. (Vgl. Knerr 1977, S. 397).

<sup>192</sup> Vgl. Heisenberg 1979a, S. 49.

<sup>193</sup> Vgl. Neumann 1996, S. 128.

<sup>194</sup> Ebd.

<sup>195</sup> Vgl. Einstein 2009, S. 6f.

einen zeitkritischen Prozess repräsentiert.<sup>196</sup> Der Mathematiker John von Neumann beschreibt in *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932), wie sich aus dem Interferenzmuster auf einer Fotoplatte der wahrscheinlichste Ort (also die Koordinate des Teilchens) aus der gegebenen Versuchsanordnung ableiten lässt.<sup>197</sup> Entscheidend dabei ist, dass die Versuchsanordnung im Grunde immer wieder ‚nachjustiert‘ werden muss, also immer wieder aufs Neue gemessen wird, bis das Experiment anhand der Teilchendichte auf dem Schirm (das Streulicht des beschossenen Teilchens) angibt, wo sich das Teilchen unter der gegebenen Versuchsanordnung am wahrscheinlichsten im Raum befand.<sup>198</sup> Die Kenntnis des techn(olog)ischen Messapparats ist von Neumann zufolge von äußerster Wichtigkeit, da anhand ihrer aus statistischen Werten ein Rückschluss auf die realweltliche Koordinate *ermittelt* werden kann.<sup>199</sup>

Orts- und Impulsmessung sind zwei unterschiedliche Messmethoden, die ihre eigene medientechn(olog)ische Anatomie benötigen. Im Folgenden wird sich dieser im Allgemeinen angenommen und dabei aufgezeigt, dass sich die Erzeugung der Wirklichkeit durch das (Mess-)Medium – im Sinne Friedrich A. Kittlers – im Schatten ihrer Diskurse befindet.

---

### **Ein ‚medientechn(olog)isches Unbestimmtheitsprinzip‘**

---

In einem Brief an Heisenberg verweist Pauli auf die Auswirkung, die das Unbestimmtheitsprinzip auf die Erzeugung von so etwas wie Welt hat: „Man kann die Welt mit dem p-Auge und man kann sie mit dem q-Auge ansehen, aber wenn man beide Augen zugleich aufmachen will, dann wird man irre.“<sup>200</sup> Demnach folgt eine jede Messung der Gesetzmäßigkeit des Unbestimmtheitsprinzips, womit das Experiment im Grunde mit der gewählten Messapparatur bereits techn(olog)isch (vor-)bestimmt ist, da die Anatomie des Messinstruments für die Bestimmung des Ortes oder des Impulses entscheidend ist.<sup>201</sup> So schreibt Pauli diesbezüglich in *Die allgemeine Prinzipien der Wellenmechanik* (1933), dass „um den Ort eines Teilchens zu bestimmen und um seinen Impuls zu bestimmen, *einander ausschließende Versuchsanordnungen* benutzt werden [müssen].“<sup>202</sup> Während zur Ortsbestimmung „stets räumlich fixierte Apparateile (Maßstäbe, Uhren, Blenden)“ verwendet werden, die einem „unbestimmte[n] Betrag

---

<sup>196</sup> Vgl. Rubinowicz 1933, S. 17; vgl. Pauli 1933, S. 98; vgl. Eddington 1927, S. 225.

<sup>197</sup> Vgl. Neumann 1996, S. 126ff.

<sup>198</sup> Vgl. ebd., S. 127.

<sup>199</sup> Vgl. ebd., S. 126ff; Anm.: Heisenberg hebt sogar hervor, dass jene Wahrscheinlichkeit erst mit so etwas wie Welt – die er als Wirklichkeit bezeichnet – verbunden werden kann, wenn das System durch den Messakt definiert ist: „Die Wahrscheinlichkeitsfunktion kann mit der Wirklichkeit nur verbunden werden, wenn eine wesentliche Bedingung erfüllt ist: wenn nämlich eine neue Messung oder Beobachtung gemacht wird, um eine bestimmte Eigenschaft des Systems festzulegen. Nur dann erlaubt die Wahrscheinlichkeitsfunktion, das wahrscheinliche Ergebnis der neuen Messung zu berechnen. Das Ergebnis der Messung wird dabei wieder in den Begriffen der klassischen Physik angegeben. [...] Es ist unmöglich, anzugeben, was mit dem System zwischen der Anfangsbeobachtung und der nächsten Messung geschieht. Nur im dritten Schritt kann wieder der Wechsel vom Möglichen zum Faktischen vollzogen werden.“ (Heisenberg 1979a, S. 45)

<sup>200</sup> Wolfgang Pauli zitiert in: Münster 2020, S. 29.

<sup>201</sup> Vgl. Pauli 1933, S. 89; vgl. Barad 2007, S. 111f; vgl. Wind 2001, S. 75.

<sup>202</sup> Pauli 1933, S. 89.

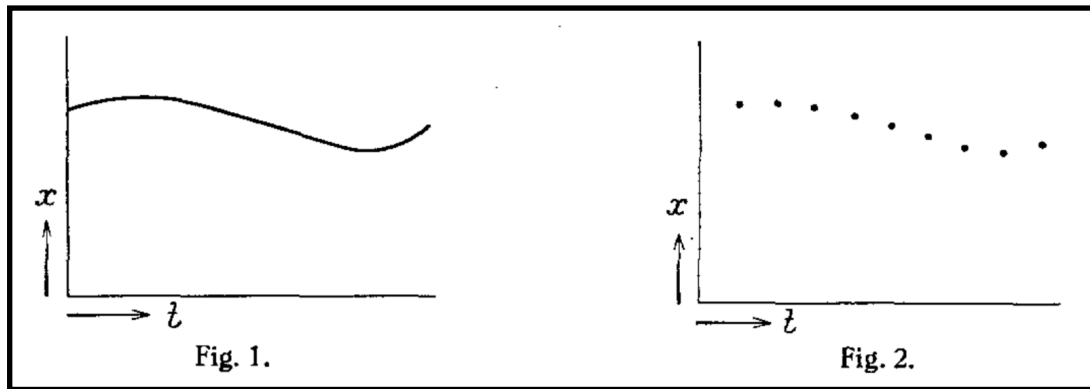


Abb. 5.: Werner Heisenbergs Vorstellung einer Repräsentation von Impuls und Ort.

von Impuls“<sup>203</sup> ausgesetzt sind, braucht es zur raumzeitlichen Verfolgung der Teilchen bewegliche Apparateile, damit – laut Karen Barad – ein ‚Transfer‘ des ‚Momentums‘ zwischen Messinstrument und Teilchen stattfinden kann.<sup>204</sup> Für Barad ist schließlich ein medientechn(olog)isches Wissen essenziell, um überhaupt ein Phänomen deuten zu können: „[T]o understand the complex nature of the phenomenon [...], it is necessary to understand the nature of apparatuses and the processes by which they are produced.“<sup>205</sup>

Die Unbestimmtheitsrelation betrifft folglich nicht nur die Messung des Ortes oder des Impulses eines Teilchens; es schließt das Messmedium mit dessen Funktionsweise ein. Dies deckt sich nicht nur mit der Ansicht Bohrs, dass das Phänomen sich in Abhängigkeit zum Messinstrument offenbart, sondern muss auch rekursiv gedacht werden: Da die Art und Weise der Ortsbestimmung sich different der des Impulses verhält, kann anhand des repräsentierten Messakts eine Aussage über den medientechn(olog)ischen Funktionstypus getroffen werden. Oder anders ausgedrückt: Ein ‚medientechn(olog)isches Unbestimmtheitsprinzip‘ spaltet Messinstrumente in zwei Lager, die jeweils – im Sinne Heisenbergs – ihre Version von Natur repräsentieren und keineswegs ein mangelndes Zeugnis von so etwas wie Welt abliefern.<sup>206</sup> Heisenberg kann sogar unterstellt werden, dass er in *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik* (1927) explizit medientechn(olog)isch wird, nämlich eben dann, wenn er neben der Beschreibung des Unbestimmtheitsprinzips ebenso die Repräsentation von Ort oder Impuls vorstellt (Abb. 5.), die der Darstellung durch medientechn(olog)isches Gerät prinzipiell gleicht:

Denkt man z.B. an die eindimensionale Bewegung eines Massenpunktes, so wird man in einer Kontinuumstheorie eine Bahnkurve  $x(t)$  für die Bahn des Teilchens (genauer: dessen Schwerpunktes) zeichnen können (Fig. 1), die Tangente gibt jeweils die Geschwindigkeit. In einer Diskontinuumstheorie dagegen wird etwa an Stelle dieser Kurve eine Reihe von Punkten endlichen Abstandes treten (Fig. 2). In diesem Falle ist es offenbar sinnlos, von der Geschwindigkeit an einem bestimmten

<sup>203</sup> Pauli 1933, S. 89.

<sup>204</sup> Vgl. Barad 2007, S. 112f, 196.

<sup>205</sup> Ebd., S. 203.

<sup>206</sup> Vgl. ebd., S. 196; vgl. Heisenberg 1979a, S. 55.

Orte zu sprechen, weil ja die Geschwindigkeit erst durch zwei Orte definiert werden kann und weil folglich umgekehrt zu jedem Punkt je zwei verschiedene Geschwindigkeiten gehören.<sup>207</sup>

Bereits mit der Wahl der Versuchsanordnung, also des Messsystems, ist die eigentliche Eigenschaft bestimmt; das gewählte Messmedium repräsentiert als raumzeitliche Relation – im Sinne Alfred N. Whiteheads – einen Aspekt der Natur entweder wellenförmig oder diskret, jedoch aufgrund der Unbestimmtheitsrelation nie beides gleichzeitig.<sup>208</sup> Nichtsdestotrotz ist lediglich einem Messtypus die Bildung von Wirklichkeit – im Sinne Kittlers – gestattet, während im gleichen Moment einem anderen Typus die Erzeugung von so etwas wie Welt streitig gemacht wird.<sup>209</sup> „Just as words provide descriptions – representations of reality – so observations reveal preexisting properties of an observation-independent reality“<sup>210</sup> – so Barad. Wie ist das zu verstehen?

In *Meeting the Universe Halfway* (2007) argumentiert Barad anhand des Piezokristalls, „the ‚soul‘ of an observing apparatus“<sup>211</sup> – in diesem Fall die Seele des Ultraschallgeräts –, dass Signale nicht nur so etwas wie Welt erzeugen, sondern ihnen auch Diskurse anhaften: <sup>212</sup>„As feminist analyses have made clear, ultrasound technology is a historically and culturally specific practice, involving discursive and material elements, that has differential effects on different bodies and lives.“<sup>213</sup> Der Philosophin Judith Butler zufolge entscheidet die medientechn(olog)ische Repräsentation – hier das Sonogramm – schließlich über die Bestimmung des Geschlechts (sex) und bereits bevor das ungeborene Subjekt überhaupt das Licht der Welt erblickt, tritt es mit ‚Kultur‘ in Kontakt und wird von ihr bestimmt (gender). Ein Körper ist laut Sara Salih, die sich dabei auf Butler bezieht, erst im sozialen Kontext begreiflich, weshalb es so etwas wie einen geschlechtslosen Körper nicht geben kann: „All bodies are gendered from the beginning of their social existence (and there is no existence that is not social), which means that there is no ‚natural body‘ that pre-exists its cultural inscription.“<sup>214</sup> Das Geschlecht (sex) ist damit – und in den Worten der Philosophin Donna J. Haraway – eine „‚imaginäre‘ Formation, die Wirklichkeit produziert, einschließlich die der Körper, die in der Wahrnehmung vor aller Konstruktion zu liegen scheinen.“<sup>215</sup>

---

<sup>207</sup> Heisenberg 1927, S. 173.

<sup>208</sup> Vgl. Barad 2007, S. 76, 197f; vgl. Neumann 1996, S. 126ff; vgl. Whitehead 1919, S. 4.

<sup>209</sup> Vgl. Kittler 1986, S. 10; vgl. Ernst 2012a, S. 293; vgl. Ernst 2012b, S. 27; vgl. Whitehead 1919, S. 13; Anm.: Als ein Beispiel lässt sich der Terminus ‚Analog-to-Digital **Converter**‘ aufführen. Hierin zeigt sich, dass von einer analogen Welt, der kontinuierlichen, ausgegangen wird. „Our world is essentially a world in which information is available in analog form; every parameter which is to be investigated (speed, temperature, etc.) varies in a continuous way; therefore man's first involvement was with analog-type signals.“ (Loriferne 1982, S. 1) Das ‚Digitale‘ ist demnach eine Umwandlung dessen und wird oftmals als weniger ‚wirklich‘ aufgefasst.

<sup>210</sup> Barad 2007, S. 195.

<sup>211</sup> Ebd., S. 189.

<sup>212</sup> Vgl. ebd., S. 189ff.

<sup>213</sup> Ebd., S. 193.

<sup>214</sup> Salih 2002, S. 62.

<sup>215</sup> Haraway 2017, S. 220.

Und auch wenn es bei einem medientechn(olog)ischen Messkörper weniger um die Frage des Geschlechts (gender) geht,<sup>216</sup> lässt sich Butlers philosophische Position als Analogie verwenden, da es sich dabei um die Materialisierung von Diskursen handelt, die mit einer Körperbestimmung einhergeht.<sup>217</sup> Vielleicht ist die medientechn(olog)ische Operation im Sinne von Whiteheads Naturverständnis als zeitkritischer Vollzug von soziokulturellen Kontexten befreit, da hier keine subjektrelevanten Relationen – und damit ebenso wenig Narrative im Sinne Wolfgang Ernsts – gebildet werden.<sup>218</sup> Doch spätestens mit der für den Menschen präparierten Facette von Natur kehren sämtliche Diskurse und Konzepte von Welt, also Axiome, wieder ein, weshalb einem jeden Messmedium bei einer diskontinuierlichen Darstellung eine ‚natürliche Wirklichkeit‘ abgesprochen wird.<sup>219</sup> Eine reine medientechn(olog)ische Operation, also eine „unmediated mediation of a non-subjective neutral truth“<sup>220</sup>, bleibt somit – in Anlehnung an Haraway und im Sinne Shintaro Miyazakis – nichts weiter als eine Illusion.<sup>221</sup>

Die Eigenschaft eines Objekts von Interesse – Licht oder Sound – ist bis zur endgültigen Repräsentation sowohl Welle als auch Teilchen, die ihrerseits auf differente Phänomene verweisen.<sup>222</sup> Mit der Offenbarung eines Phänomens geht jedoch nicht nur die Eigenschaft des Lichts bzw. des Sounds einher, sondern – im Sinne Butlers – ebenso ein ganzer Katalog soziokultureller und historischer Diskurse, welche einem jeden diskontinuierlichen Signal das Recht absprechen, so etwas wie Natur überhaupt darstellen zu dürfen.<sup>223</sup> Denn obwohl jenes Phänomen sich dem Menschen erst mittels Medium offenbart, beharrt ein homologes Axiom darauf, dass das, was Subjekt sich erschließt, in seiner natürlichsten Form bereits vor der ‚Medienpräparation‘ als Kontinuierliches existiert.<sup>224</sup> Dies ist jedoch im Sinne einer hier aufgezeigten medienwissenschaftlichen Deutung nicht haltbar, da das metaphorische Wesen des Naturspektakels von der medientechn(olog)ischen Anatomie abhängt. Demnach ist das Phänomen im Sinne Bohrs mit dem Messmedium verschränkt und jene Diskurse richten sich sowohl an den techn(olog)ischen Apparat – der nichtsdestotrotz seine Medienoperation unbeeindruckt ausführt – als auch vice versa, wie Barad hervorhebt:

---

<sup>216</sup> Auch eine Zuschreibung von Geschlecht (gender) bzgl. Maschinen ist möglich, wie etwa bei sogenannten ‚Sexdolls‘, die spätestens im Zeitalter künstlicher Intelligenz auch wissenschaftliche Diskurse bilden. (Vgl. Cheok *et al.* 2017) Ein Messinstrument kann – als Sensor – Teil solch einer Maschine sein, doch gilt es an anderer Stelle zu diskutieren, inwieweit dies dem Messinstrument (sex) als solches ein Geschlecht (gender) zuschreibt.

<sup>217</sup> Vgl. Butler 2011, S. xvii ; vgl. Barad 2007, S. 192; Anm.: Barad kritisiert, dass es ihr bei Butler an Materialität fehlt: „Butler's account fails to analyze how *matter* comes to matter.“ (Barad 2007, S. 192).

<sup>218</sup> Vgl. Ernst 2012a, S. 292; vgl. Ernst 2017, S. 12; vgl. Whitehead 1920, S. 53f; vgl. Miyazaki 2020, S. 2.

<sup>219</sup> Vgl. Aziz *et al.* 1996, S. 61; vgl. Loriferne 1982, S. 1; vgl. Ernst 2004b, S. 54; vgl. Pavan *et al.* 2017, S. 27; vgl. Watkinson 2001, S. 81; Anm.: „For digital audio use, the prime purpose of binary numbers is to express the values of the samples which represent the original analog sound-velocity or pressure waveform.“ (Ebd.).

<sup>220</sup> Miyazaki 2020, S. 3.

<sup>221</sup> Vgl. ebd.; vgl. Haraway 2017, S. 220.

<sup>222</sup> Vgl. Barad 2007, S. 198.

<sup>223</sup> Vgl. ebd., S. 189; vgl. Butler 1990, S. 33.

<sup>224</sup> Vgl. Ernst 2012b, S. 270; vgl. Barad 2007, S. 198.



„The materialization of an apparatus is an open (but nonarbitrary) temporal process: apparatuses do not simply change in time; they materialize (through) time. *Apparatuses are themselves material-discursive phenomena, materializing in intra-action with other material-discursive apparatuses.*“<sup>225</sup>

Folglich geht mit der Wahl des techn(olog)ischen Messmediums ebenso eine Entscheidung von so etwas wie Welt einher, die sich aus den für das Subjekt präparierten raumzeitlichen Relationen ergibt. In diesem Sinne schließt das Kapitel mit der Möglichkeit ab, sich im Folgenden die Doppelnatur des sonischen Signals medientheoretisch zu erschließen, indem die Bildung raumzeitlicher Relationen techn(olog)isch im Computer und Phonautograph nachvollzogen und begründet werden.

---

<sup>225</sup> Barad 2007, S. 203.

# PRÄSENTATION

---

## Das sonische Signal via Computer

Bereits zwei Jahre vor der Publikation der Informationstheorie (1948), meldete Claude E. Shannon gemeinsam mit dem Ingenieur Bernard M. Oliver ein Patent an, in dem von einer komplexen Welle die Rede ist, die mittels Pulse-Code-Modulation (PCM) diskretisiert wird, um dadurch die Übertragung durch einen höheren Signal-Rauschabstand (**S**ignal-to-**N**oise-**R**atio) zu optimieren.<sup>226</sup> Allerdings entspricht das durch Oliver *et al.* beschriebene Verfahren einem Signalwesen, dessen medientechnologische Repräsentation sich different zu kontinuierlichen Darstellungssystemen verhält, weshalb dessen Rauschverhalten – wenn man so will – nicht mehr in SNR bestimmt werden kann.<sup>227</sup> Denn laut dem Nachrichtentechniker Alexander Lerch und dem Tonmeister Stefan Weinzierl ergibt sich der SNR aus dem „Pegelverhältnis von Signalleistung  $W_S$  zu Fehlerleistung  $W_Q$ “. <sup>228</sup> Dies trifft jedoch nicht mehr auf das durch Oliver *et al.* patentierte Verfahren zu,<sup>229</sup> welches als technologisches Kommunikationssystem ein diskontinuierliches Signal repräsentiert und dessen ‚Rauschen‘ auf die ‚Unschärfe der Natur‘ verweist – dazu später mehr. Es ist letztlich das vermeintliche Axiom der *Schallwelle* als natürlich(st)e Signalform, der der PCM als messtechnologisches Verfahren die Erzeugung von so etwas wie Welt verwehrt und damit das

---

<sup>226</sup> Vgl. Oliver & Shannon 1957, Sp. 1; Anm.: Im Sinne der vorliegenden Arbeit muss PCM als ein Verfahren beschrieben werden, dessen vollzogener Akt sich dem Subjekt als diskontinuierlich präsentiert. (Vgl. ebd., Sp. 1ff; vgl. Watkinson 2001, S. 81).

<sup>227</sup> Vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 791.

<sup>228</sup> Ebd.; Anm.: Die mathematische Bezeichnung lautet  $SNR=10\log(W_S/W_Q)$ . (Vgl. ebd.) Lerch & Weinzierl geben jedoch an, dass aus diskreten Werten ein theoretischer SNR errechnet werden kann. (Vgl. ebd., S. 791ff).

<sup>229</sup> Vgl. ebd.

diskontinuierliche Signalwesen als defizitäres Abbild des Natürlichen diskriminiert,<sup>230</sup> wie beispielsweise geschehen durch Abraham A. Moles in *Kunst & Computer* (1973): „[W]enn man der Eingabe des Apparates ein Signal liefert, das in Funktion der Zeit variiert, **splittert** dieser es auf, das heißt **zerlegt** es in Teile von einen Zehntausendstel Sekunde [...].“<sup>231</sup>

Dieses Kapitel widmet sich der konkreten Bestimmung des sonischen Signals, also den Fragen: *Welche Fähigkeit zur Auswahl ist im zu beobachteten Signal prominent? Wie ist das ‚Signalwesen‘ beschaffen?* Eng entlang der eigentlichen medientechn(olog)ischen Operation soll die in den Kapiteln PRÄPARATION & ENTSCHEIDUNG offenbarte sowie medientheoretisch gedeutete Doppelnatur eines Objekts von Interesse – hier die des Sonischen – nun medienphysiologisch geerdet werden. Während sich zunächst dem Verbundsystem ‚Sigma-Delta<sup>232</sup> Analog-to-Digital Converter ( $\Sigma\Delta$ -ADC) + Computer‘<sup>233</sup> angenommen wird, soll im zweiten Teil das sonische Signal via Phonautograph + -gramm bestimmt werden. Ausgehend von der (Mikrophon-)Membrane als ein gemeinsames Registrierungsobjekt, das die ‚Fähigkeit zur Auswahl‘ zeitkritisch im physikalischen Raum<sup>234</sup> vollzieht, lässt sich unter Rückbesinnung des medientechn(olog)ischen Unbestimmtheitsprinzips ein diskontinuierliches oder kontinuierliches Signal ableiten.<sup>235</sup>

Während der technische Messakt des Phonautographen eine direkte Repräsentation von so etwas wie Welt anbietet, da die Bewegung der Membrane via Schweineborste ohne Umwege direkt aufs Phonautogramm übertragen wird, stellt das aus  $\Sigma\Delta$ -ADC und Computer bestehende technologische Ensemble eine Herausforderung bzgl. der Deutung des sonischen Signals via Computer dar: Um die Aktivität der am Anfang des Ensembles stehenden Membrane mit dem im Speicher repräsentierten sonischen Signal kurzzuschließen, bedarf es einer schrittweisen Annäherung, die aus ‚Zwischenmessungen‘ besteht. Bei dem repräsentierten Signal der Zwischenmessung handelt es sich allerdings um ein differentes techn(olog)isches Ensemble, ganz so, als würde der Doppelspalt um einen reduziert werden; keine Lappalie etwa, sondern eine getroffene Entscheidung, die Auswirkung auf die Erzeugung von so etwas wie Welt hat. Die Zwischenmessungen repräsentieren somit immer nur die Eigenschaft eines sonischen Signals bis zu jenem gemessenen Moment. Es handelt sich also um eine Repräsentationen von gewissen techn(olog)ischen Ensembles, die das sonische Signal

---

<sup>230</sup> Vgl. Aziz *et al.* 1996, S. 61; vgl. Loriferne 1982, S. 1; vgl. Pflüger 2005, S. 20.

<sup>231</sup> Moles 1973, S. 64. [*Hervorhebung durch Autor DF*].

<sup>232</sup> Im Sinne von Dan Sheingold wird in dieser Arbeit aufgrund der Funktionshierarchie von der  $\Sigma\Delta$  Modulation gesprochen. (Vgl. Sheingold 1990).

<sup>233</sup> Mit Computer ist hier der speicherprogrammierbare Digitalrechner gemeint, der laut dem Informatiker Wolfgang Coy aus einem Speicher sowie einem Rechen- und Steuerwerk besteht. (Vgl. Coy 1988, S. 14). Die Eingabegeräte Mikrofon sowie ADC werde im Sinne Norbert Wieners als ‚künstliche Sinnesorgane‘ des Computers verstanden, die eine „Kopplungsmöglichkeit[] mit der äußeren Welt“ ermöglichen. (Vgl. Wiener 2002, S. 167) Die Trennung zwischen ‚künstlichem Sinnesorgan‘ und Computer ermöglicht es, Messakt und Repräsentation gezielter zu untersuchen.

<sup>234</sup> Da sich die Membrane im Grunde lediglich auf und ab bewegt, ist hier der eindimensionale Raum im Sinne Knerrs gemeint – dazu später mehr. (Vgl. Knerr 1977, S. 58).

<sup>235</sup> Vgl. Richter 1985, S. 23.

vor dem Computer darstellen.<sup>236</sup> Es muss jedoch klar sein, dass das diskontinuierliche sonische Signal, repräsentiert im Speicher des Computers, als Argument ausreichen müsste, um die Doppelnatur des Sonischen aufzuzeigen. Doch da es nicht nur um die Dualität des Sonischen geht, sondern ebenso um das Signalwesen, lohnt sich der mühselige Weg einzelner epistemischer Etappen, damit schließlich die differente Erzeugung von so etwas wie Welt zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Mediensystemen begreiflich wird.

Nun ließe sich wegen der Wahl von ‚ $\Sigma\Delta$ -ADC + Computer‘ und ‚Phonautograph + -gramm‘ meinen, dass die Moderne auf die Klassik trifft. Doch ist bereits dieses chronologische Narrativ ein Rückfall in das homologe Axiom des Schwingenden als natürlich Vorhandenen, was diese Arbeit zu beseitigen sucht. Und so wird auch weiterhin von den Begrifflichkeiten Analog/Digital Abstand gehalten, da diese von Diskursen stark durchsetzten Terminologien wenig hilfreich sind.<sup>237</sup> Stattdessen bleibt es bei der Unterscheidung zwischen Kontinuierlichem und Diskontinuierlichem, welche selbstverständlich ebensowenig frei von Zuschreibungen sind, jedoch bis hierhin in der Arbeit ausreichend thematisiert und kritisiert wurden, um damit brauchbare Medientheorie zu betreiben. Als nächstes soll sich nun dem diskontinuierlichen sonischen Signal im Verbundsystem ‚ $\Sigma\Delta$ -ADC + Computer‘ angenommen werden. Begonnen wird mit einem Funktionsüberblick des  $\Sigma\Delta$ -ADCs.<sup>238</sup>

Laut dem Elektroingenieur Dieter Stotz ist der Aufbau des  $\Sigma\Delta$ -ADC vergleichsweise simpel und das „nachgeschaltete Digitalfilter ist der aufwändigste Teil des Wandlers.“<sup>239</sup> Das Prinzip des  $\Sigma\Delta$ -ADC fußt den Ingenieuren Walter Kester und James Bryant zufolge auf dem Konzept der Delta-Modulation, die auch „differential PCM“<sup>240</sup> genannt wird.<sup>241</sup> Das Ziel ist – so Kester und Bryant –, „to achieve higher transmission efficiency by transmitting the *changes* (delta) in value between consecutive samples rather than the actual samples themselves.“<sup>242</sup> Konkret bedeutet dies für einen  $\Sigma\Delta$ -ADC erster Ordnung<sup>243</sup>: Ein am Eingang angelegter Spannungswert  $V_{IN}$  passiert einen Addierer (Operationsverstärker) und gelangt zum Integrator ( $\Sigma$ ), welcher seinen vorherigen Wert

---

<sup>236</sup> Der  $\Sigma\Delta$ -ADC ist lediglich im Shipformat erhältlich (vgl. Kester & Bryant 2005, S. 233; vgl. AD7723 2005; vgl. Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 1), weshalb explizites Messen an gewissen ‚Stellen‘ ohne spezielles Gerät nicht durchführbar ist. Folglich muss sich auf gegebene Literatur bezogen werden. Auch wenn eine solche Messung zukünftig wünschenswert wäre, würde diese keineswegs Auswirkungen auf die hier angeführte Argumentation haben, da die Zwischenmessungen das sonische Signal vor dem Computer darstellen und nicht via Computer.

<sup>237</sup> Ein Überblick zum Diskurs des Analogen / Digitalen sowie dessen Bildung wird unter anderem durch Pflüger 2005 angeboten.

<sup>238</sup> Eine tiefere Auseinandersetzung mit dem  $\Sigma\Delta$ -ADC und -DAC findet sich in: Kester & Bryant 2005; Pavan *et al.* 2017. Das  $\Sigma\Delta$ -ADC Prinzip in ‚umgekehrter Richtung‘ entspricht der Funktion des  $\Sigma\Delta$ -DAC (vgl. Kester & Bryant 2005, S. 249), was für die hier aufgestellte Argumentation allerdings irrelevant ist. Erst bei einer Bestimmung der Zeitlichkeit im Subjekt wird auch der DAC entscheidend.

<sup>239</sup> Stotz 2011, S. 49.

<sup>240</sup> Kester & Bryant 2005, S. 231.

<sup>241</sup> Vgl. ebd.

<sup>242</sup> Ebd.

<sup>243</sup> Bei  $\Sigma\Delta$ -ADCs höherer Ordnung wird durch Hinzufügen von Integratoren der theoretische SNR verbessert. (Vgl. Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 4f) In dieser Arbeit wird der Einfachheit ausschließlich vom  $\Sigma\Delta$ -ADC erster Ordnung gesprochen.

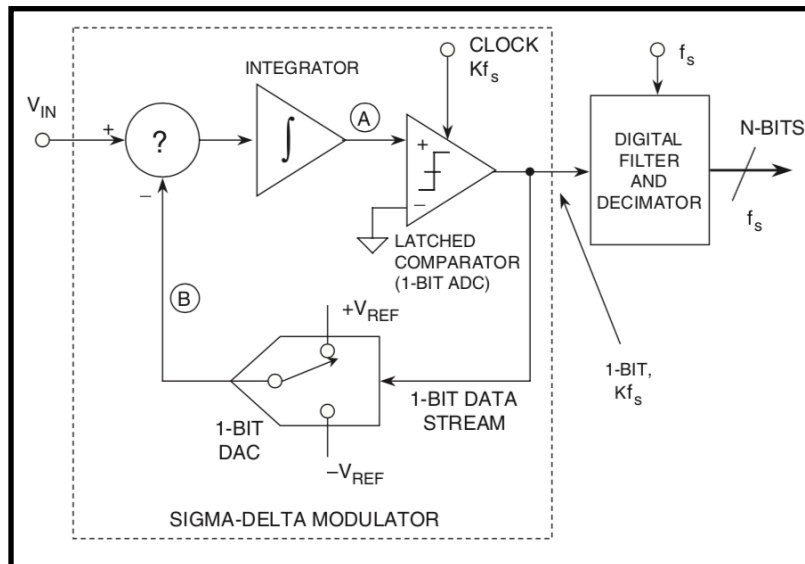


Abb. 6.:  $\Sigma\Delta$ -ADC erster Ordnung.

mit dem Neuen aus der Addierstufe zusammenzieht.<sup>244</sup> Der nachfolgende Komparator (A) – im Grunde ein 1-Bit ADC – „vergleicht den Integrationswert mit einem Schwellwert“<sup>245</sup> und gibt eine deutlich unterscheidbare Spannung in *high* oder *low* (1 oder 0) aus.<sup>246</sup> Dieser Prozess kann als ‚Abtastung‘<sup>247</sup> bezeichnet werden und entspricht – laut dem Ingenieur John Watkinson – einer periodischen Messung.<sup>248</sup> Der dabei erzeugte ‚Bitstream‘ wird zum einen direkt in das Digitalfilter und den Dezimator geleitet – dazu später mehr.<sup>249</sup> Zum anderen wird der Bitstream über einen 1-Bit DAC zurück zum Eingangssignal geleitet, dessen „Wert [...] negiert und der Addierstufe zugeführt“<sup>250</sup> wird.<sup>251</sup> Dieser Architekturtypus eines ‚wahren‘ „Nyquist sigma-delta ADC with a digital filter and a decimator following the modulator“<sup>252</sup> wurde laut Kester und Bryant erstmals durch David J. Goodman in *The Application of Delta Modulation to Analog-to-PCM Encoding* (1969) beschrieben.<sup>253</sup>

Auch wenn der  $\Sigma\Delta$ -ADC lediglich mit einem Komparator (1-Bit ADC) operiert, erzeugt diese Architektur eine äußerst hohe Auflösung – und das ohne Sample & Hold

<sup>244</sup> Vgl. Stotz 2011, S. 50.

<sup>245</sup> Ebd.

<sup>246</sup> Vgl. ebd.; vgl. Kester & Bryant 2005, S. 231.

<sup>247</sup> Der Begriff des Samplings (anstelle von Abtastung) verleitet zur Annahme, dass ‚Proben‘ eines bereits determinierten kontinuierlichen Signals entnommen werden, wie etwa geschehen durch Bernard Loriferne: „[R]eplacing the given continuous function by a discontinuous function consisting of ‚cut outs‘ from the original function.“ (Loriferne 1982, S. 9).

<sup>248</sup> Vgl. Watkinson 2001, S. 198; Anm.: „Sampling is no more than periodic measurement, [...]“ (Ebd.).

<sup>249</sup> Vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 787; vgl. Stotz 2011, S. 50.

<sup>250</sup> Ebd.

<sup>251</sup> Vgl. ebd.; Anm.: Das Zurückführen des Bitstreams zum Eingang sorgt für das sogenannte ‚Noise Shaping‘. (Vgl. Watkinson 2001, S. 250).

<sup>252</sup> Kester & Bryant 2005, S. 233.

<sup>253</sup> Vgl. ebd.; vgl. Goodman 1969; Anm.: Eine Medienarchäologie würde weitaus früher ansetzen: Demnach lässt sich das Episteme des 1-Bit ADCs im Kontaktmikrophon wiederfinden, welches durch den Erfinder J. P. Reis bereits 1861 realisiert wurde. (Vgl. Schneider 2008, S. 318).

Glied.<sup>254</sup> Um Auflösungen von bis zu 24 Bit auch ohne Sample & Hold Glied zu realisieren, muss das zeitkritische Eingangssignal ebenso zeitkritisch im Komparator verglichen werden.<sup>255</sup> Bereits 1960 beschreibt C. C. Cutler in seinem Patent *Transmission Systems Employing Quantization* das Prinzip des Oversamplings („Überabtastung“<sup>256</sup>) und dem daraus resultierenden „Noise Shaping“<sup>257</sup> des  $\Sigma\Delta$ -ADCs.<sup>258</sup> Watkinson bezeichnet das Oversampling als „a sampling rate which is greater (generally substantially greater) than the Nyquist rate.“<sup>259</sup> Ausgehend vom Sampling-Theorem<sup>260</sup> wird folglich im Komparator des  $\Sigma\Delta$ -ADCs mit einem Vielfachen der eigentlich benötigten Abtastfrequenz  $f_s$  operiert: Der Integrationswert im Komparator wird mit der erhöhten Abtastrate  $Kf_s$  verglichen und später wieder im Digitalfilter und Dezimator durch eine geringere Frequenz  $f_s$  reduziert.<sup>261</sup> Liegt beispielsweise die Oversamplingrate bei 64x, ergibt dies bei  $f_s = 48 \text{ kHz}$  insgesamt  $Kf_s = 3.072 \text{ MHz}$  ( $64 \times 48 \text{ kHz}$ ) Abtastwerte pro Sekunde.<sup>262</sup>

Oversampling hat schließlich Auswirkung auf das Quantisierungsrauschen, welches wiederum laut Watkinson abhängig von der durch die Abtastrate erzeugten Bandbreite ist und bei Erhöhung jener, durch Verteilung auf dieser ‚schrumpft‘.<sup>263</sup> Das Quantisierungsrauschen wird im Rahmen der konkreten medienwissenschaftlichen Deutung später näher beschrieben, da in Anlehnung an den Physiker Horst Völz eine Verbindung zwischen Sampling-Theorem und Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip

<sup>254</sup> Vgl. AD7723 2005, S. 1; vgl. Stotz 2011, S. 47ff; Anm.: Als ein Beispiel für einen ADC mit Sample & Hold Glied lässt sich das Wägeverfahren (Sukzessive Approximation) nennen. (Vgl. ebd.) Im Wägeverfahren werden – laut Stotz – die einzelnen Bits der Reihe nach gesetzt, bis der Bitwert dem Eingangswert entspricht. (Vgl. ebd., S. 49) Das Sample & Hold Glied ist hierbei zentral, da der Eingangswert so lange gehalten werden muss, bis der ‚Vergleich‘ vorüber ist. (Vgl. ebd.; vgl. Loriferne 1982, S. 7; vgl. Watkinson 2001, S. 209ff) Im realweltlichen Prozess kann der Spannungswert nie ohne Verlust gehalten werden, weshalb der stellvertretende Bitwert immer nur ein angenäherter Wert sein kann. (Vgl. ebd., S. 211f).

<sup>255</sup> Vgl. Kester & Bryant 2005, S. 232, 250.

<sup>256</sup> Werwein & Schick 2008, S. 895.

<sup>257</sup> „By sampling at a high enough rate, the greater part of the error power can be concentrated at frequencies above the signal band, so that by suitable filtering there can be derived at the receiving terminal a reproduced signal which is a more exact replica of the original message wave.“ (Cutler 1960, Sp. 1).

<sup>258</sup> Vgl. Cutler 1960, Sp. 1; Anm.: Laut Kester & Bryant verkörpert Cutlers Patent alles, was ein  $\Sigma\Delta$ -ADC benötigt – bis auf das entscheidende Digitalfilter. (Vgl. Kester & Bryant 2005, S. 232).

<sup>259</sup> Watkinson 2001, S. 252.

<sup>260</sup> Vgl. Shannon 1948, S. 35f; vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 788; vgl. Kester 2005, S. 76; Anm.: Das Sampling-Theorem besagt, dass jedes kontinuierliche Signal verlustfrei rekonstruiert werden kann, wenn es mit der doppelten Frequenz  $f_s$  abgetastet wird. (Vgl. ebd.) In der Regel wird von einer Abtastfrequenz von 44.1 kHz oder 48kHz gesprochen, die sich am menschlichen Hörspektrum orientiert. (Vgl. Hermann „Signalabtastung“ (Vorlesungsskript WS 2010/2011), S. 6) In dieser Arbeit wird sich jedoch von einer solchen antropozentrischen Determination – wenn möglich – entfernt, da spätestens im Zeitalter künstlich-intelligenter Rechenmaschinen auch höhere Abtastfrequenzen von Interesse sein können. Außerdem: Das Abtasttheorem behandelt ebenso den Alaising-Effekt, welcher eine ‚falsche‘ Rekonstruktion des Signals beschreibt. (Vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 788f) Bezeichnet man jedoch die Abtastfrequenz als Bandbreite, (Vgl. Watkinson 2001, S. 252f; vgl. Kester 2005, S. 77) erscheint das Alaising nicht mehr als Rekonstruktionsfehler, weil es hierbei nun um eine Aufzeichnung des Signals außerhalb der Bandbreite geht. Dieses Konzept findet sich im Übrigen im Antialaising-Filter, der im Grunde lediglich ein Tiefpassfilter ist und das obere Frequenzband beschneidet. (Vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 789).

<sup>261</sup> Vgl. Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 7f.

<sup>262</sup> Vgl. Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 7f.

<sup>263</sup> Vgl. Kester & Bryant 2005, S. 236f; vgl. Watkinson 2001, S. 252f; vgl. AD7723 2005, S. 18.

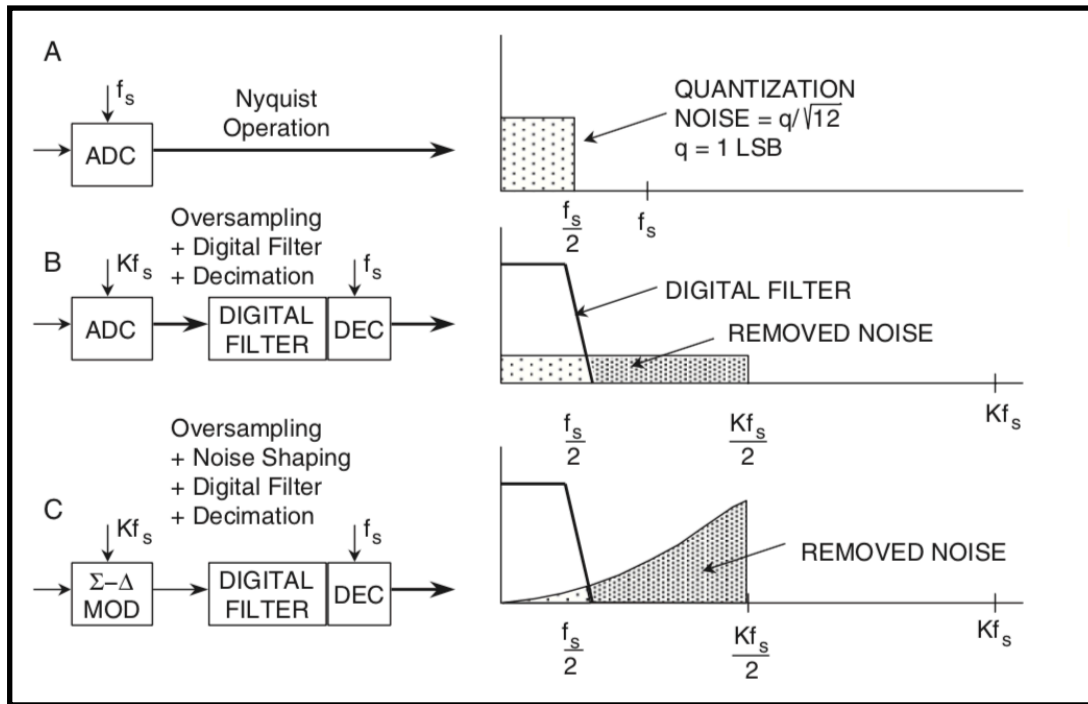


Abb. 7.: Das Quantisierungsrauschen in Abhängigkeit zu Oversampling, Digitalfilter, Noise Shaping und Dezimation.

besteht.<sup>264</sup> Des Weiteren fußen die Erklärungen bzw. Beschreibungen des Quantisierungsrauschens in nahezu jeder Literatur auf dem kontinuierlichen Signal, dessen Lücken zwischen den vermeintlichen ‚Ausschnitten‘ als Rauschen interpretiert werden.<sup>265</sup> Es wird sich jedoch zeigen, dass dieses Rauschen auch ohne Bezug auf das Kontinuierliche bestimmt werden kann. Im Folgenden wird sich nun dem Digitalfilter und der Dezimation gewidmet, die in der ‚klassischen Deutung‘ als Quantisierung bezeichnet werden, da hierbei ein zuvor vermeintlich kontinuierlicher Spannungswert durch einen diskreten Wert ersetzt wird.<sup>266</sup>

Der aus dem Komparator hervorgehende Bitstream wird im Digitalfilter und Dezimator zum Bitwert, ausgedrückt als n-Bit-Datenwort, das der Computer wiederum organisiert und speichert.<sup>267</sup> Denn der aus der  $\Sigma\Delta$ -Modulation erzeugte Bitstream ist laut Kester und Bryant an und für sich zunächst nutzlos: „For any given input value in a single sampling interval, the data from the 1-bit ADC is virtually meaningless. Only when a large number of samples are averaged, will a meaningful value result.“<sup>268</sup> Im Digitalfilter wird anhand des Bitstreams ein Mittelwert errechnet, der  $V_{IN}$  annähernd

<sup>264</sup> Vgl. Völz 2018, S. 188; vgl. Völz 2020, S. 14.

<sup>265</sup> Vgl. Watkinson 2001, S. 220; Anm.: „Quantizing causes a voltage error in the audio sample which is given by the difference between the actual staircase transfer function and the ideal straight line.“ (Ebd.).

<sup>266</sup> Vgl. Lerch & Weinzierl 2008, S. 790.

<sup>267</sup> Vgl. Kester & Bryant 2005, S. 237; vgl. Watkinson 2001, S. 10, 100; Anm.: Dem Digitalfilter können zwei zentrale Funktionen zugeschrieben werden, wie in einem durch *Analog Devices* veröffentlichten Anwendungshinweis geschehen: „First, it must act as an antialiasing filter with respect to the final sampling rate,  $f_s$ . Second, it must filter out the higher frequency noise produced by the noiseshaping process of the sigma-delta modulator.“ (Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 5).

<sup>268</sup> Kester & Bryant 2005, S. 237.

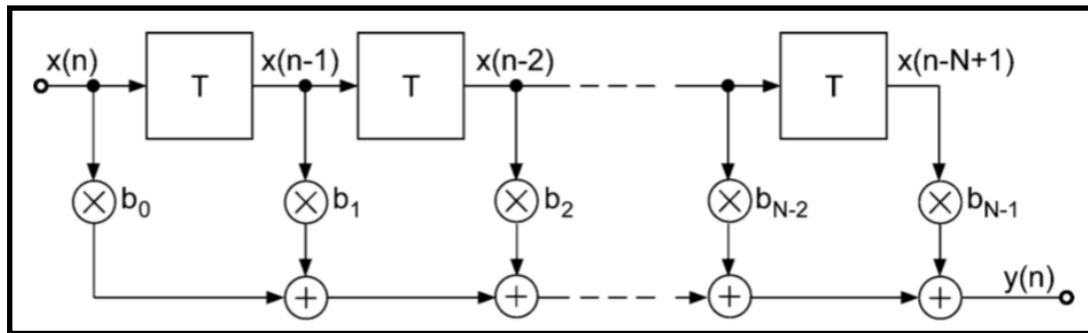


Abb. 8.: FIR (Blockschaltbild) der Länge  $N$ .

entspricht.<sup>269</sup> Da im gleichen Moment die Datenrate reduziert wird – also ein ‚downsampling‘ (Dezimation) stattfindet, aus dem ein PCM-Signal hervorgeht – ist im Digitalfilter der Dezimator<sup>270</sup> oftmals mitgemeint.<sup>271</sup> So wird beispielsweise im FIR (Finite Impulse Filter) das Signal durch „Verzögerung und gewichtete Summation“<sup>272</sup> ermittelt, um schließlich als konkreter Bitwert definiert werden zu können.<sup>273</sup> Die einzelnen *highs* und *lows* des Bitstreams treten im FIR bei  $x(n)$  ein und werden bis zu  $x(n-N+1)$  ‚geschoben‘. „Man bezeichnet dies als nichtrekursives FIR-Filter, da nur vorwärts gerichtete Operationen auftreten“<sup>274</sup> – so der Nachrichtentechniker Uwe Zölzer. Der Output  $y(n)$  ist schließlich der als Datenwort zu codierende Bitwert. Dabei ist entscheidend, dass  $y(n)$  aus der Anzahl der *highs* und *lows* hervorgeht; die Reihenfolge, also wann diese ins FIR eintreten, ist irrelevant.<sup>275</sup> Folglich entspricht beispielsweise ein Bitstream, der das FIR mit einer Sequenz von 0101 passiert, einem Durchschnitt von  $2/4$  und dieses Verhältnis wird als Datenwort ausgedrückt.<sup>276</sup> Ein identisches Datenwort geht aus einem Bitstream hervor, der das FIR mit einer Sequenz von 1100 durchläuft, da auch hier das Verhältnis  $2/4$  besteht.<sup>277</sup> Konkret bedeutet dies, dass beide Sequenzen (1010 oder 1100) sich laut Kester und Bryant durch  $2^2$  Bit als Ordnungszustand bzw.

<sup>269</sup> Vgl. Zölner 2008, S. 816; vgl. Werwein & Schick 2008, S. 894f.

<sup>270</sup> Als Dezimator wird der Abschnitt bezeichnet, wo „[t]he signal is resampled at the lower rate (the decimation rate) [...]“. Decimation can also be viewed as the method by which the redundant signal information introduced by the oversampling process is removed.“ (Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 5).

<sup>271</sup> Vgl. Werwein & Schick 2008, S. 895; vgl. Pavan *et al.* 2017, S. 451f; Anm.: Es wird unterschieden zwischen FIR (Finite Impulse Filter) und IIR (Infinite Impulse Response). Handelt es sich um einen FIR ist das Digitalfilter auch gleichzeitig ein Dezimator, wohingegen beim IIR die Filteroperation aufgrund des „feedback term“ (Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 6) für jeden Input einen Output errechnen muss und damit die Dezimation nicht Teil der Operation sein kann. (Vgl. ebd.).

<sup>272</sup> Zölzer 2008, S. 817.

<sup>273</sup> Vgl. Pavan *et al.* 2017, S. 5; Anm.: Laut Udo Zölzer gibt es drei Grundoperationen der ‚digitalen‘ Signalverarbeitung: 1.) „Gewichtung eines Signals [...]“. 2.) „Summation von gewichteten Signalen [...]“. 3.) „Verzögerung eines Signals um  $M$  ganzzahlige Abtastakte [...]“. (Zölzer 2008, S. 815f). Verknüpft mit Rechenvorschriften (Algorithmen) lassen sich – weiter Zölzer – aus Punkt 2. und 3. Filteroperationen entwerfen, die einen Mittelwert aus dem eingehenden Bitstream erzeugen. (Vgl. ebd., S. 816).

<sup>274</sup> Zölzer 2008, S. 825.

<sup>275</sup> Vgl. Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 2f, 6; vgl. Kester & Bryant 2005, S. 238.

<sup>276</sup> Vgl. Pavan *et al.* 2017, S. 49; vgl. Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 2f, 6; vgl. Kester & Bryant 2005, S. 238.

<sup>277</sup> Vgl. Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“, S. 2f, 6; vgl. Kester & Bryant 2005, S. 238.



Datenwort ausdrücken lassen: „The output of the filter is 2/4. This value represents bipolar zero. If more samples are averaged, more dynamic range is achieved. For example, averaging four samples gives 2 bits of resolution, while averaging eight samples yields 4/8, or 3 bits of resolution.“<sup>278</sup> Diese Verteilungsfunktion oder Dichte kennzeichnet laut dem Signaltheoretiker Johann F. Böhme einen stochastischen Prozess gänzlich.<sup>279</sup> Folglich handelt es sich hierbei um einen irreversiblen Prozess, der es – ähnlich wie in der Thermodynamik – nicht mehr erlaubt ausgehend vom Datenwort Rückschlüsse auf die Bitstream-Sequenz der  $\Sigma\Delta$ -Modulation zu ziehen.<sup>280</sup>

Nachdem ein Überblick der Funktion des  $\Sigma\Delta$ -ADCs gegeben wurde, kann sich nun dem sonischen Signal via Computer gewidmet werden. Es wird sich zeigen, dass ein Verständnis der Technologie – im Sinne von Karen Barad, Wolfgang Ernst und Niels Bohr – für die Deutung des sonischen Signals notwendig ist. Mehr noch: Das sonische Signalwesen provoziert eine eigene Repräsentation von so etwas wie Welt, die ohne Technologieverständnis nicht nur verpasst wird, sondern sich gänzlich verwehrt. Demnach offenbart sich im Folgenden nicht nur eine Doppelnatur des Sonischen; im selben Moment zeigt sich auch die Zeitigung raumzeitlicher Relationen aus dem Signal heraus.

Während die Informationstheorie darauf abzielt, den Informationsgehalt eines Kommunikationssystems mathematisch zu definieren (aus dem sich die notwendige Bandbreite für das Übermitteln von Nachrichten ergibt), handelt es sich beim Messakt des performenden  $\Sigma\Delta$ -ADCs und dem via Computer repräsentierten Signal um eine tatsächliche Bestimmung von Information, also die Darstellung konkreter Ordnungszustände. Die Mikrophonmembrane dient dabei als Registrierungsobjekt, dessen physikalische Darbietung im Rahmen der  $\Sigma\Delta$ -Modulation in zwei Zuständen ausgedrückt wird; dem Maß der Information, dem Bit. Die zeitkritische Abtastung  $K_f$  im Komparator entspricht der Beobachtungsfrequenz – im Sinne Werner Heisenbergs<sup>281</sup> – der bewegenden Mikrophonmembrane, die zunächst als Bitstream repräsentiert wird. Im Folgenden soll sich nun dieser Beobachtung angenommen werden, die Auskunft über die Art der Messung gibt. Es muss jedoch in Erinnerung gerufen werden, dass die Repräsentation des Bitstreams eine hinter dem Komparator getroffene raumzeitliche Bestimmung des sonischen Signals ist. Tatsächlich handelt es sich bei der Bewegung der Membrane um einen unbekannten sowie zeitlosen Prozess, der einer anhaltenden Veränderung unterliegt – im Sinne Alfred N. Whiteheads – und erst in der Repräsentation terminiert wird. Nichtsdestotrotz bietet es sich an, den Bitstream an dieser Stelle näher zu untersuchen, da dieser eine Verbindung zur physikalischen Membranbewegung darstellt.

---

<sup>278</sup> Ebd., S. 237f.

<sup>279</sup> Vgl. Böhme 1993, S. 92.

<sup>280</sup> Vgl. Aziz *et al.* 1996, S. 62; vgl. Bense 1998, S. 135; Anm.: „Man berechnet Prozesse – thermodynamische Prozesse –, die, wie sie später genau beschrieben wurden, die Eigenschaft besitzen, nicht umkehrbar, nicht wieder auf den Ausgangspunkt genau reduzierbar zu sein und denen man den Namen ‚irreversible Prozesse‘ gab.“ (Ebd.).

<sup>281</sup> „[W]as geschieht, hängt davon ab, wie wir das Geschehen beobachten, oder wenigstens von der Tatsache, daß wir es beobachten.“ (Heisenberg 1979a, S. 51).

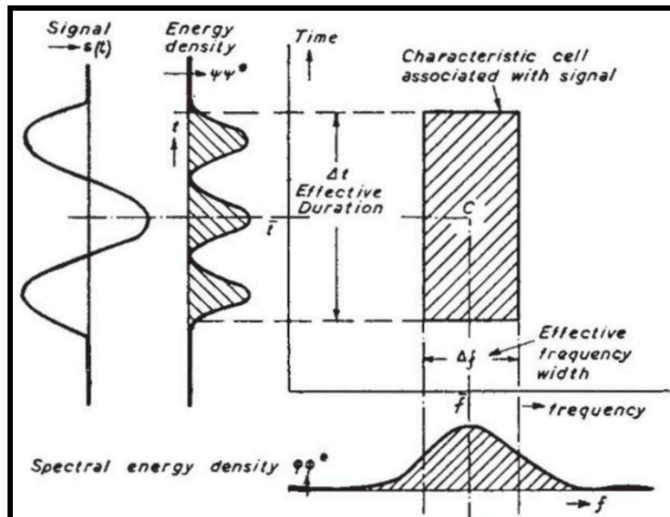


Abb. 9.: Quantum of Sound.

Aus der Frage heraus, was Mensch zu hören vermag, entwickelt der Physiker Dennis Gabor in *Acoustical Quanta and the Theory of Hearing* (1947) das „quantum of sound“<sup>282</sup>, da die zu seiner Zeit angebotenen Ansätze unzureichend waren:<sup>283</sup> [O]ur sensations find[] no expression either in the description of sound as a signal  $s(t)$  in function of time, or in its representation by Fourier components  $S(f)$ .<sup>284</sup> Gabor geht zunächst von der Wellenfunktion aus, begründet im Wellenpaket Erwin Schrödingers.<sup>285</sup> Entscheidend ist nun, dass er beschreibt, wie sich aus der Zeit die Energiedichte bzw. -intensität des Signals ableiten lässt:<sup>286</sup>

Consider a given signal described as  $s(t)$  in 'time language' and by its Fourier transform  $S(f)$  in 'frequency language'. If  $s(f)$  is real,  $S(f)$  will be in general complex, and the spectrum will extend over both positive and negative frequencies. This creates an unwelcome asymmetry between the two representations, which can be eliminated by operating with a complex signal  $\psi(t) = s(t) + i\sigma(t)$ , where  $\sigma(t)$  is the Hilbert transform of  $s(t)$ , instead of with the real signal  $s(t)$ . This choice makes the Fourier transform  $\phi(f)$  of  $\psi(t)$  zero for all negative frequencies. Next we define the 'energy density' of the signal as  $\psi\psi^*$ , where the asterisk denotes the conjugate complex value, and similarly  $\phi\phi^*$  as the spectral energy density.<sup>287</sup>

Gabors Beschreibung des 'quantum of sound' ist gleichzeitig eine Versuchsbeschreibung für die Verortung der Mikrophonmembrane in ihrer dazugehörigen Kapsel via  $\Sigma\Delta$ -ADC, wie sich im Folgenden zeigen wird.

<sup>282</sup> Gabor 1947, S. 592.

<sup>283</sup> Mehr zum physiologischen Hörakt in: Encke *et al.* 2016.

<sup>284</sup> Gabor 1947, S. 591.

<sup>285</sup> Vgl. ebd., S. 591f; vgl. Pauli 1933, S. 98.

<sup>286</sup> Vgl. Gabor 1947, S. 591; Anm.: Laut Louis De Broglie ist jene gemeinte Dichte proportional zur Intensität: „[T]he photon density in the wave must be proportional to the intensity.“ (De Broglie 1929, S. 253). In dieser Arbeit werden deshalb die beiden Begriffe synonym verwendet.

<sup>287</sup> Gabor 1947, S. 591.

Die Bewegung der Membrane drückt die Fähigkeit zur Auswahl des Signals während der  $\Sigma\Delta$ -Modulation als rechteckförmiger Bitstream aus. Daraus leitet sich – im Sinne Gabors – jedoch nicht nur die Energiedichte in der Zeit ab. „A wave must be associated with each corpuscle and only the study of the wave’s propagation will yield information to us on the successive positions of the corpuscle in space“<sup>288</sup> – so der Physiker Louis De Broglie. Der rechteckförmige, aus *highs* und *lows* zusammengesetzte Bitstream ermöglicht es im Digitalfilter die Informationsintensität – also die Anzahl an getroffenen Entscheidungen – zu bestimmen: Wie oft wurde während  $x$  Beobachtungen eine Entscheidung getroffen? Nicht ‚Wann wurden die Entscheidungen getroffen?‘, sondern ob. Damit ist jedoch bereits hier die Entscheidung für die Repräsentation von so etwas wie Welt getroffen, da sich mit der Frage der Intensität, der ‚jetzt, dann, damals‘ Zeit im Sinne Martin Heideggers entledigt wird. Mehr noch: Bei dem messtechnologischen System, das das sonische Signal via Computer definiert, handelt es sich um eine Ortsmessung, im Gegensatz zur zeitkritischen Impulsmessung (siehe Kap. ENTSCHEIDUNG). Damit sollte bereits jetzt klar sein, dass das sonische Signal via Computer keineswegs ‚beschnitten‘ wird.

Da das Messsystem bekannt ist,<sup>289</sup> gibt der aus der Informationsintensität *ermittelte* – und aufgrund dessen nicht reversible – (Mittel-)Wert den wahrscheinlichste Ort an, an dem die Mehrzahl der Wellenfunktionen innerhalb der Mikrofonkapsel kollabiert ist. Diese zeitbefreite Koordinate, also der Ort, an dem sich die mobile Mikrofonmembrane nach  $x$  Mal Schauen befindet, ist im Digitalfilter jedoch als *ermittelter* (Bit-)Wert noch nicht ‚verkörpert‘; sprich, die Koordinate ist noch keine Information von Raum. Der im  $\Sigma\Delta$ -Prozess *ermittelte* Ortswert ist ein zeitloser Wahrscheinlichkeitswert. Mehr noch: Dieser Wert existiert schlichtweg noch nicht, da dieser bisher noch nicht ‚informiert‘ – im Sinne der Ordnung – ist. Der Ordnungszustand, also die Information selbst, geht allerdings erst aus der Zeit hervor; Information ist somit auch immer zeitkritisch. Erst mit der Clock im Digitalfilter kehrt die zurückgelassene Zeit als eine Neue wieder ein; das Messsystem drückt den ermittelten Koordinatenwert unter Berücksichtigung der Bitrate als ein zeitkritisches  $n$ -Bit-Datenwort aus. Damit zeitigt das Digitalfilter nicht nur die eigentliche Information, sondern erzeugt überhaupt erst eine Repräsentation von so etwas wie Raum. Das sonische Signal besitzt damit die Fähigkeit durch Information (Ordnung) einen Ort (Koordinate) auszudrücken. Wie kann sich das vorgestellt werden?

Mensch erschließt sich so etwas wie Welt durch raumzeitliche Relationen (siehe Kap. PRÄPARATION). In Bezug auf die Repräsentation des sonischen Signals ist damit der zweidimensionale Raum – im Sinne des Mathematikers Richard Knerr – gemeint, der durch zwei voneinander unabhängige Maße bestimmt ist:<sup>290</sup> Die Auf- und Abwärtsbewegung der Membrane bildet eine Dimension, die gemeinsam mit der Zeit –

<sup>288</sup> De Broglie 1929, S. 252.

<sup>289</sup> Beispiel: Laut Kester und Bryant hat ein Bitstream, der abwechselnd 0 und 1 repräsentiert, eine Eingangsspannung von 0V. (Vgl. Kester & Bryant 2005, S. 237). Ergo: Die Membran ist in ‚Ruheposition‘.

<sup>290</sup> Vgl. Knerr 1977, S. 58.

als weiterer Dimension – ein zweidimensionales Signal repräsentiert. Im Grunde lässt sich behaupten, dass sich mit dem Besorgen der Zeitlichkeit das sonische Signal dem Menschen raumzeitlich als zweidimensionaler Raum präsentiert. Die Krux an der Sache bzgl. des sonischen Signals via Computer ist nur, dass die aus der  $\Sigma\Delta$ -Modulation hervorgetretene, einzelne Koordinate an und für sich zeitlos ist; es fehlt ihr mindestens an einem Maß, nämlich der Zeit. Zwar geht die Koordinate als *ermittelter* Wert aus einem zeitlichen Prozess hervor, doch ist in diesem irreversiblen Prozess schon die Entledigung der Zeitlichkeit inbegriffen. Und damit nicht genug: Die einzelne Koordinate bildet für sich genommen – wenn überhaupt – einen nulldimensionalen Raum.<sup>291</sup> Erst wenn die ordnungstiftende Zeit als Dimension hinzukommt, bildet sich aus der einzelnen Koordinate schließlich so etwas wie ein zweidimensionaler Raum, der sich dem Menschen erschließt und bereits durch Werner Heisenberg 1927 dargestellt wurde (siehe *Abb. 5, Fig. 2*). Bevor eine Relationsbildung der einzelnen Koordinaten allerdings stattfinden kann, muss die Koordinate selbst informiert werden. Deshalb bietet sich an, in Anlehnung an Ernst, zwischen mikro- und makrotemporalem Prozess zu unterscheiden.<sup>292</sup>

Der mikrotemporale Prozess entzieht sich laut Ernst der unmittelbaren Wahrnehmung des Menschen subliminal.<sup>293</sup> Und eben im mikrotemporalen Prozess wird Information als solche durch den oszillierenden Quarzkristall – also der Clock – gezeitigt;<sup>294</sup> sprich, eine Koordinate wird überhaupt erst geschaffen, in Anlehnung an Ernst: „Das Sein wird auf den technischen Takt gebracht.“<sup>295</sup> Die Koordinate ist im System Computer lediglich als realweltliche Information existent, nämlich als zeitkritischer Ordnungszustand von Spannungsextremen, dem Datenword. Oder (chrono)poetisch formuliert: Erst Bit für Bit und schließlich das Wort, im ‚Mikrotempo‘ entsteht ein Ort. Dieser stellt die wahrscheinlichste Position der Membrane in der Mikrofonkapsel dar. Erst wenn der mikrotemporale Prozess einen Ort zeitkritisch ausgedrückt hat, kann auf makrotemporaler Ebene eine raumzeitliche Relation zwischen Koordinaten hergestellt werden. Demnach werden auf der makrotemporalen Ebene die zu repräsentierenden Koordinaten zeitlich zu Gunsten des Computers

---

<sup>291</sup> Vgl. ebd.

<sup>292</sup> Selbst wenn die Termini mikro/makro als solche unscharf sind, lässt sich anhand ihrer das sonische Signal via Computer verdeutlichen, da die Begriffe eine hierarchische Ordnung ausdrücken.

<sup>293</sup> Vgl. Ernst 2012b, S. 28.

<sup>294</sup> Vgl. van Treeck 2018, S. 6; Anm.: Laut dem Medienwissenschaftler Jan C. van Treeck ist die ‚Clock‘ im Computer ein „rhythm-inducer“ (ebd.), der die einzelnen *highs* und *lows* organisiert, zugleich aber auch definiert, (Vgl. ebd., S. 5f) wie der Informatiker Peter Rechenberg hervorhebt: „[D]er gesamte Rechner [wird] durch *Taktimpulse* gesteuert, das sind sehr kurze, ständig gleichmäßig wiederholte Uhr-Impulse, die die Umschalt- und Abfrage-Zeitpunkte aller anderen Signale bestimmt. [...] Der Abfragetaktimpuls tritt immer in der Mitte zwischen zwei Umschalttaktimpulsen auf. Zu diesem Zeitpunkt kann man sich sicher sein, daß die Signale, die ihren Zustand beim letzten Umschalttaktimpuls verändert haben, inzwischen auf ihren Endwerten 0 oder 1 angekommen sind.“ (Rechenberg 2000, S. 45) Dieses Organisieren bzw. das Umschalten von einem Spannungspotential zum anderen braucht wiederum Zeit. Und weil zwischen zwei Taktimpulsen das Wissen über den Zustand des Systems schlichtweg – und im Sinne von Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip – fehlt, bezeichnet Norbert Wiener diesen Prozess als ‚Time-of-non-Reality‘. (Vgl. Pias 2009, S. 268, 270) Ein Kurzschluss zu John Wheelers Antirealismus liegt nicht nur nahe, sondern springt einem förmlich entgegen.

<sup>295</sup> Ernst 2015, S. 314.

organisiert: Die durch den  $\Sigma\Delta$ -ADC produzierten Datenwörter werden im Sinne der Zeitlichkeit ‚jetzt, dann, damals‘ zueinander geordnet, indem sie beispielsweise adressiert und in „Speicherzelle[n]“<sup>296</sup> verfrachtet werden.<sup>297</sup> Erst jetzt sind Analyse und Interpretation des repräsentierten Signals durch beispielsweise Fast Fourier Transformation (FFT) möglich, die laut Watkinson nichts weiter als eine schnellere Variante der Diskreten Fourier Transformation (DFT) darstellt.<sup>298</sup>

Die raumzeitlichen Relationen werden via Computer aus der zeitlichen Ordnung von Datenwörtern realisiert, die wiederum aus einem stochastischen Prozess hervorgegangen sind und der Clock des Computers gehorchen.<sup>299</sup> Das Sonische via Computer lässt sich schließlich als ein diskontinuierliches Signal definieren:

*Das sonische Signal besitzt die Fähigkeit mit einem zeitkritischen Ordnungszustand, der Information, einen Ort zu zeitigen. Da eine einzelne Koordinate keine Zeitlichkeit aufweist, wird erst auf makrotemporaler Ebene eine raumzeitliche Relation zwischen den Koordinaten erzeugt. Das sonische Signal offenbart sich im Computer als diskontinuierlicher Produzent von so etwas wie Welt; ein an und für sich noch nicht vorhandener Raum wird erst zeitkritisch erzeugt. Kurz gesagt: **Das Signal zeitigt den Raum.***

Abschließend soll sich dem Quantisierungsrauschen gewidmet werden, das sich nun im metaphorischen Gewand einer Ortsmessung kleidet und vom Determinismus der kontinuierlichen Welle losgelöst ist. Das Quantisierungsrauschen wird darüber hinaus zum medienwissenschaftlichen Episteme, das dem sonischen Signal via Computer einen medientechnologischen ‚Klang‘ verleiht.

Das sonische Signal via Computer geht aus einer Ortsmessung hervor; einem stochastischen Prozess, der die wahrscheinlichste Position der Mikrofonmembrane in

---

<sup>296</sup> Rechenberg 2000, S. 35.

<sup>297</sup> Laut den Informatikern Peter J. Denning und Matti Tedre organisiert der Computer Daten, die aus Bitmustern – also Ordnungszuständen – bestehen, in Registern und logischen Schaltungen, welche jene Daten in jenen Registern berechnen. (Vgl. Denning & Tedre 2019, S. 57) Dem Informatiker Wolfgang Coy zufolge wird die Verarbeitung im Computer durch die CPU (Central Processing Unit) organisiert, die „ein Steuerwerk zur Steuerung des Programmablaufs und ein Rechenwerk zur Verarbeitung der Daten enthält [...]“. (Coy 1988, S. 8) Entscheidend ist nun, dass mit der Adressierung der Datenwörter eine Zeitlichkeit von ‚zuvor, jetzt, später‘ einkehrt und Relationen im Sinne Whiteheads erzeugt. Neben dieser zeitlichen Verortung durch Adressierung der Datenwörter, lassen sich laut dem Audioingenieur Mel Lambert durch weitere Bits zusätzliche Daten hinzufügen: „[T]hat [bits] could carry additional data to identify, for example, the types of digital audio being carried, whether emphasis has been used, copy protection information, two time codes, and a host of other extremely useful identification bits.“ (Lambert 1990, S. 688).

<sup>298</sup> Vgl. Watkinson 2001, S. 174; Anm.: Die DFT operiert auf der makrotemporalen Ebene mit den aus der mikrotemporalen Ebene hervorgetretenen Datenwörtern – im Sinne einer hier nicht verwendeten Terminologie auch als ‚Samples‘ bekannt. Die Spektralanalyse kann erst aus der Relation der einzelnen Koordinaten zueinander erfolgen. (Vgl. ebd., S. 177) Mehr noch: Eine Wellendarstellung, aber auch die Spektral- oder *Ceptrum*darstellung (vgl. Bogert *et al.* 1963), fußt immer auf der makrotemporalen Ebene, die ohne den mikrotemporalen Unterbau nicht realisiert werden kann. Denn eine jede mathematische Funktion, wie etwa die der Fouriertransformation (vgl. Hermann „Signalabtastung“ (Vorlesungsskript WS 2010/2011), S. 16), braucht zur Berechnung eben ihre ‚Gegenstände‘, die zunächst mikrotemporal erzeugt werden wollen.

<sup>299</sup> Spricht man dem Datenwort den Status eines Maßes zu, so ergibt sich mit dem Maß der ‚Zeit‘ ebenso ein zweidimensionaler ‚Raum‘, obwohl lediglich eine Bitsequenz vorliegt.

der Kapsel *ermittelt*. In Anlehnung an Heisenberg handelt es sich bei den *ermittelten* Koordinaten nicht um ungenaue Messwerte, sondern diese entsprechen schlichtweg der natürlichen ‚Unschärfe‘.<sup>300</sup> „Die Unschärfen, von denen die Rede ist, sind Breiten von Wahrscheinlichkeitsverteilungen“<sup>301</sup> – erinnert Gernot Münster. Entscheidend ist nun, dass im Sinne Münsters die als Information ausgedrückte Koordinate nicht ‚unscharf‘ oder ‚ausgeschmiert‘ ist, sondern die genaue Kenntnis der Koordinate ‚unscharf‘ ist.<sup>302</sup> Dies würde auch erklären, warum sich das Quantisierungsrauschen auf die Bandbreite verteilt, die sich aus der Abtastrate ergibt: Je öfter man sich die Bewegung der Membrane innerhalb einer Zeit  $x$  anschaut, desto wahrscheinlicher wird die Gewissheit der Position. Oder in Heisenbergs Worten: „Beobachtet heißt [...], beobachtet innerhalb der Genauigkeit des Experiments. Sie stellt den Grad unserer Kenntnis dar, insofern ein anderer Beobachter vielleicht die Lage [...] noch genauer hätte kennen können.“<sup>303</sup>

In der klassischen ‚Deutung‘ wird das Quantisierungsrauschen noch von der Umwandlung eines kontinuierlichen Signals her gedacht:

Der Fehler resultiert aus der Tatsache, daß eine Umsetzung Zeit benötigt. Während dieser Umsetzungszeit darf sich das Eingangssignal höchstes um 1/2 LSB verändern, da sonst der ausgegebene Code nicht dem Analogwert zur Zeit der Umsetzungsauslösung entspricht. Die Steigerung des Eingangs muß also kleiner sein als 1/2 LSB [Least Significant Bit] während  $t_{um}$ .<sup>304</sup>

Horst Völz wendet sich jedoch bereits von diesem, auf dem Kontinuierlichen basierenden Ansatz ab, indem er das Quantisierungsrauschen aus der Unbestimmtheitsrelation heraus bestimmt: „Mit der Planck-Konstante  $h$ , den Toleranzen für die Zeit  $\Delta t$  und die Energie  $\Delta E$  besteht der Zusammenhang  $\Delta t \cdot \Delta E \geq h/2$ . Mit der Photonen-Energie  $\Delta E = h \cdot \nu$  folgt daraus:  $\Delta t \geq 1/2\nu$ .“<sup>305</sup> Demnach kann das Quantisierungsrauschen nie kleiner werden, als das durch Heisenberg definierte Unbestimmtheitsprinzip, weshalb der Terminus „*quantization uncertainty*“<sup>306</sup> zutreffender ist. Folglich lässt sich abschließend behaupten, dass sich die inhärente Unschärfe der Natur dem Subjekt hörbar als ‚*quantization uncertainty*‘ offenbart.

Das sonische Signalwesen via Computer ließ sich medienwissenschaftlich – und unter Berücksichtigung quantenphysikalischer Prozesse – als ein diskontinuierliches Signal beschreiben, welches Koordinaten im System Computer durch eine neu eingeführte (System-)Clock erzeugt und raumzeitliche Beziehungen zwischen eben jenen Koordinaten so etwas wie Welt provozieren. Im Folgenden wird sich dem sonischen Signal via Phonautograph angenommen. Es wird sich zeigen, dass sich das sonische Signal im System Phonautograph in der Zeitigung des Raumes offenbart.

<sup>300</sup> Vgl. Heisenberg 1927, S. 194.

<sup>301</sup> Münster 2020, S. 29.

<sup>302</sup> Vgl. ebd.

<sup>303</sup> Heisenberg 1979a, S. 43f.

<sup>304</sup> Eckl *et al.* 1990, S. 43.

<sup>305</sup> Völz 2020, S. 14.

<sup>306</sup> Kester / Sheingold & Bryant 2005, S. 67.

---

## Das sonische Signal via Phonautograph

In einem Eintrag des *The Century Dictionary. An Encyclopedic Lexicon of the English Language* von 1895 wird der Phonautograph beschrieben als „[a]n instrument for registering the vibrations of a sounding body. [...] If the membrane is at rest the trace of the style is a straight line, but when the sound enters the membrane vibrates, and the writing-point registers these vibrations with great perfection.“<sup>307</sup> Nach diesem Funktionsüberblick folgt direkt im selben Eintrag ein Kurzschluss zum Aufnahmegerät, wenn es heißt „[s]ame as music-recorder.“<sup>308</sup> Auch wenn der Phonautograph nicht aus eigener Kraft zur Wiederaufführung der aufgenommenen sonischen Signale in der Lage ist – und vermutlich bereits damals unter einem Musikrekorder das Wiedergabegerät antizipiert wurde –, trifft die Beschreibung des Phonautographen als ‚music-recorder‘ dennoch zu.<sup>309</sup> Allerdings ist er auch nicht mehr: Als Messinstrument vom Franzosen Édouard-Léon Scott de Martinville konzipiert, lag das Interesse weniger in der Wiedergabe bereits verklungener Ereignisse, sondern vielmehr im Studium zeitkritischer Phänomene, die für die trägen menschlichen Sinne nicht fassbar sind, so Friedrich A. Kittler: „Scotts Meßschreiber [...] ließ sehen, was nur zu hören gewesen war und viel zu rasch für unbewaffnete Augen: hunderte von Schwingungen pro Sekunden.“<sup>310</sup> Zwar war dem französischen Erfinder bereits bekannt, dass „motion that produces sound is always a motion of vibration“<sup>311</sup>, doch fehlte es an eben jenen ‚bewaffneten Augen‘ zur raumzeitlichen Erfassung dieser Bewegung.

In seiner Schrift *Principes de Phonautographie* (1857) beschreibt Scott de Martinville in vier Prinzipien seinen automatischen Klangschrreiber, welcher schließlich durch Repräsentation dem Menschen jene Bewegungen zugänglich macht:

1. An acoustic concha, suitable for conducting and condensing aerial vibrations. A system of suspension analogous to the lens-holder, but held up near the trumpet by a support with screw. This system is intended to allow for all sorts of positions of the instrument.
2. A tympanum of English goldbeater's skin, strong but very flexi-

---

<sup>307</sup> Whitney 1895, S. 4450, Eintrag ‚Phonautograph‘; Anm.: Scott de Martinvilles erste Konstruktion war der ‚Flatbed‘ Phonautograph (1857), der sich vom späteren Zylinder-Modell (1859) dadurch unterscheidet, dass das Phonautogramm flach über einen Tisch gezogen wird, statt sich als Zylinder gerollt zu drehen. (Vgl. Thomas Edison National Historical Park (b)) Das Modell von 1859 wurde später auch mit einer Stimmgabel ausgestattet, deren Frequenz als weitere Spur neben der aufgenommenen so etwas wie einen ‚Time-Code‘ darstellte, anhand dessen sich die aufgenommene Spur untersuchen ließ. (Vgl. Feaster 2010, S. 68) Da in dieser Arbeit vor allem die Repräsentation der Membranbewegung im Fokus steht hängt, die Argumentation nicht von den jeweiligen Konstruktion ab, da diese sich so marginal unterscheiden, dass kein Unterschied in der Argumentation ersichtlich wäre. Inwieweit dies auch auf den Techno-logos im Sinne Ernsts zutrifft, muss an anderer Stelle untersucht werden. Es lässt sich jedoch bereits mutmaßen, dass der Flatbed Phonautograph stärker durch die damalige Schriftkultur geprägt war als dessen Nachfolgekonstruktion. (Vgl. Kittler 1995, S. 289ff).

<sup>308</sup> Whitney 1895, S. 4450, Eintrag ‚Phonautograph‘.

<sup>309</sup> Unter dem Titel *Researchers Play Tune Recorded Before Edison* berichtet *The New York Times* im Jahr 2008, wie es Wissenschaftlern von *First Sounds* gelungen sei, mit der Technologie des *Lawrence Berkeley National Laboratory* still geglaubte Phonautogramme ertönen zu lassen. (Vgl. Rosen 2008; vgl. *First Sounds* „The Phonautograms of Édouard-Léon Scott“). Damit lässt sich dank Computertechnologie auch die Information eines Phonautogramms wieder aufrufen, womit die Wiedergabe zumindest an externer Stelle einkehrt.

<sup>310</sup> Kittler 1986, S. 44.

<sup>311</sup> Scott de Martinville 1857, S. 6.

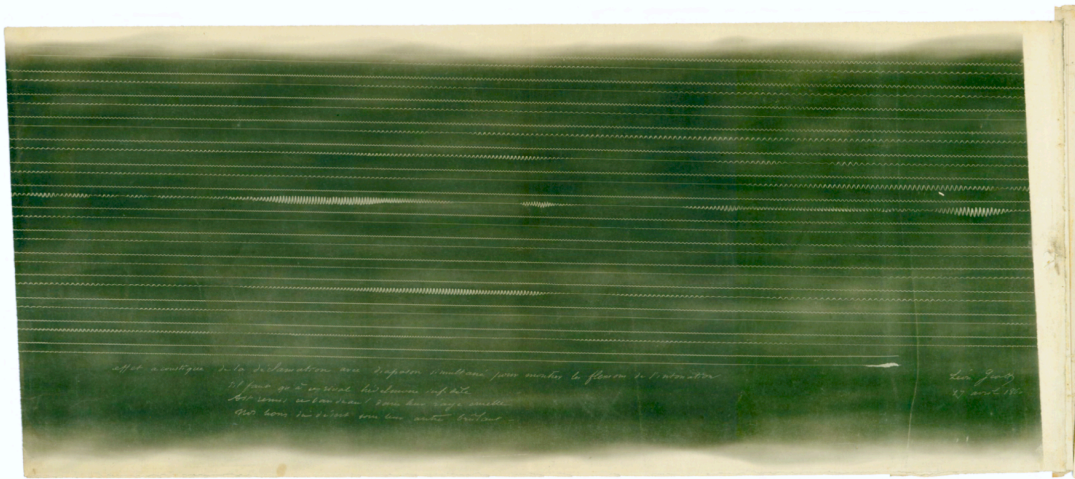


Abb. 10.: Phonautogramm ‚Fixation et Transcription du Chant (1860)‘

ble and very thin; then an external membrane. The distance between the two membranes increases or decreases at my will; consequently, the enclosed box of air finds itself more or less compressed between them according to need. 3. A stylus responsible for writing and placed suitably to touch the stratum the plane of the sensitive stratum. 4. A mobile crystal table following certain laws of regularity, covered above with a good stratum of lampblack, underneath with a paper provided with millimetric divisions in both directions.<sup>312</sup>

Auch wenn die beschriebenen vier Prinzipien der Phonautographie aus heutiger Sicht vermeintlich simpel daherkommen – und vermutlich einfacher verständlich sind als das Verbundsystem ‚ $\Sigma\Delta$ -ADC + Computer‘ –, entfaltet das sonische Signal als solches, repräsentiert im Phonautogramm, sein mächtiges Episteme nach wie vor in der Gegenwart: Mit einer nahezu omnipräsenten Selbstverständlichkeit wird die aufgezeichnete Welle auch heutzutage als ‚natürliche‘ Form des Hörbaren verstanden. Dabei repräsentiert diese – im Sinne Heisenbergs – nur eine Facette von Natur.

Im Folgenden wird sich dem sonischen Signal via Phonautograph gewidmet, indem die raumzeitliche Relationsbildung anhand des technischen Artefakts untersucht wird. Um den Sprachjargon der Informationstheorie weiterhin nutzen zu können und damit das Sonische via Phonautograph vom raumzeitigenden Signalwesen via Computer zu differenzieren, erscheint eine Annäherung mittels  $\Sigma\Delta$ -Modulation zunächst wenig sinnvoll. Doch auch wenn die Darstellung der  $\Sigma\Delta$ -Modulation sich in jeglicher (technologischer) Form vom hier zu untersuchenden Gegenstand unterscheidet, lässt sich diese zumindest als Analogie verwenden und so das Signalwesen – mit dem in dieser Arbeit verwendeten Informationsverständnis – zu beschreiben. Die Definition des sonischen Signalwesens via Phonautograph ist wiederum unabhängig von dieser an die Informationstheorie angelehnten Herangehensweise und ergibt sich aus dem tatsächlichen Messmedium, das der französische Erfinder einst konstruierte. Es wird sich zeigen, dass das sonische Signal via Phonautograph ein kontinuierliches ist, welches aus der Zeitigung des Raumes hervorgeht.

<sup>312</sup> Ebd., S. 10.



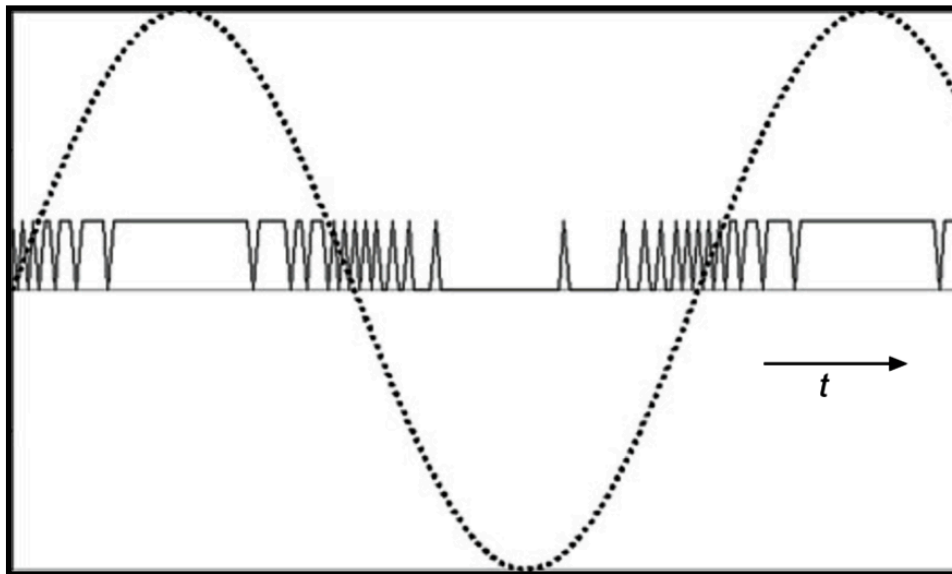


Abb. 11.: Rechteckwelle versus Sinuswelle

Auch wenn aufgrund der leicht begreiflichen Funktionsweise des Phonautographen mit einer direkten medienwissenschaftlichen Deutung des sonischen Signals begonnen werden könnte, lohnt es sich, einen technischen Überblick zu geben – wenn auch nur ein kurzen. Im Grunde setzt sich der Phonautograph aus Trichter<sup>313</sup>, Membrane, ‚Stichel‘ und einer verrußten Oberfläche (die als Detektor dient) zusammen.<sup>314</sup> Der auf der tanzenden Membrane befestigte ‚Stichel‘ kratzt das Ruß vom bewegenden Detektor. Am Ende offenbart sich auf der verrußten Darmhaut das sonische Signal dem Subjekt wellenförmig. Wie lässt sich nun das sonische Signalwesen definieren?

Die offenbarte Wellencharakteristik leitet bereits die Aufmerksamkeit auf die Messung des Impulses bzw. der Geschwindigkeit. Doch dies muss sich in der Eigenschaft des Signals, welches die ‚Fähigkeit zur Auswahl‘ besitzt, wiederfinden, damit sich anhand dessen sein Wesen erschließen lässt. Die Umwandlung – und nun entfaltet dieser Terminus einmal seine Richtigkeit – des Wellenförmigen in einen Bitstream mittels  $\Sigma\Delta$ -Modulation erhellt schließlich den Blick auf die für die Impuls- bzw. Geschwindigkeitsmessung entscheidenden Parameter (Abb. 11.)<sup>315</sup>. Der an und für sich ebenso kontinuierliche Bitstream stellt  $V_{IN}$  in Abhängigkeit der Clock des Komparators entweder als *high* oder *low* dar. Im Messprozess des  $\Sigma\Delta$ -ADCs ist die

<sup>313</sup> Da der Trichter lediglich eine verstärkende Wirkung hat, lässt sich der Phonautograph theoretisch auch ohne diesen denken. (Vgl. Friedrich 2018, S. 22).

<sup>314</sup> Scott de Martinville benutzte verrußte Goldschlägerhaut als Detektor des sonischen Signals. (Vgl. Scott de Martinville 1857, S. 10) Dabei handelt es sich um tierische Darmhaut, die sowohl robust als auch elastisch bleibt und sich zum ‚Schlagen‘ von Blattgold eignete. (Vgl. Brücke & Schulze 1959, S. 143ff) Daraus ergab sich schließlich auch ihr Name.

<sup>315</sup> Anmerkung zur Abb. 11.: Auch wenn die Darstellung keine ideale Rechteckwelle mit 90° Flanken zeigt, beschreiben Kester & Bryant den Bitstream als solche. (Vgl. Kester & Bryant 2005, S. 237) Im Datenblatt des CMOS AD7723 wird jedoch deutlich, dass eine solche ideale 90° Flanke nicht existiert, (Vgl. AD7723 2005, S. 6ff) da das Wechseln der Spannungspotentiale immer Zeit benötigt. (Vgl. Watkinson 2001, S. 7) In diesem Zusammenhang ist auch das sogenannte *Jitter* von Bedeutung, auf das hier in der Arbeit nicht weiter eingegangen werden kann. (Dazu: Czapor 2019).

Anzahl an beobachteten Entscheidungen – die Informationsintensität – von Bedeutung, aus der sich die wahrscheinlichste Position der Mikrofonmembrane *ermitteln* lässt, die diskret ausgedrückt wird. Bleibt der Bitstream unbehandelt, verlagert sich der Fokus auf die Dauer der Entscheidung bzw. die Entfernung zwischen Entscheidungen, also ‚*Wie lange wird eine getroffene Entscheidung gehalten?*‘ oder ‚*Wann wurde die Entscheidung getroffen?*‘. Das Signal besitzt folglich die Fähigkeit zur zeitkritischen Auswahl von Längenverhältnissen, die laut Albert Einstein aus der Beschreibung der Bewegung resultiert.<sup>316</sup> Einsteins Ansicht bildet schließlich im Folgenden die Analogie zwischen Rechteck- und Sinuswelle, um daraufhin die Beschreibung des sonischen Signalwesens via Phonautograph zu definieren.<sup>317</sup>

Die Beschreibung der Bewegung eines Körpers – in diesem Fall der Membrane – kommt laut Einstein in *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (1916) „erst dadurch zustande, daß man angibt, wie der Körper seinen Ort *mit der Zeit* ändert, d.h. es muß für jeden Punkt der Bahnkurve angegeben werden, zu welcher Zeit der Körper sich dort befindet.“<sup>318</sup> Was nun die Sinuswelle des Phonautogramms und die Rechteckwelle innerhalb der  $\Sigma\Delta$ -Modulation gemein haben, ist das Repräsentieren der Membranperformance in Längenverhältnissen, die sich aus der Zeitigung des Raumes ergeben. Doch erst wenn sich dem sonischen Signal im Phonautogramm mittels der Analogie  $\Sigma\Delta$ -Modulation angenähert wird, lässt sich die informationstheoretische Ordnung von Entscheidungslängen nutzen, welche im Terminus der Wellenlänge bzw. -geschwindigkeit nicht sofort ersichtlich ist.

Eine klassische Beschreibung der aus der Bewegung resultierenden ‚Welle‘ erfolgt durch das *Institute of Sound and Vibration Research (ISVR)* an der University of Southampton:

The greater the rate at which the point moves back and forth, the greater the frequency ( $f$ ) of the wave (defined as the number of oscillation cycles a particle makes each second, and given the units of Hertz, Hz, which has dimensions of (1/time)). It is the inverse of the **period** (in seconds) which measures the amount of time it takes for a wave to complete one oscillation or cycle. More generally, the distance between similar points on successive waves is called the **wavelength**  $\lambda$  (in metres). The speed at which the wave goes from one place to the other is called the **wave velocity**  $v$  (in metres per second).<sup>319</sup>

Die durch das *ISVR* beschriebenen Wellenlängen und -geschwindigkeiten sind nicht lediglich Längenverhältnisse, die aus den zwei Dimensionen Raum und Zeit hervorgehen. Sie beschreiben eine durch Zeitigung offenbarte Länge einer getroffenen Entscheidung sowie ihre ‚Haltezeit‘; eine raumzeitliche Relation, die sich dem Subjekt erst als solche erschließt.

Die Bewegung der Membrane des Phonautographen präsentiert sich dem Subjekt wellenförmig im Phonautogramm; die Fähigkeit des sonischen Signals offenbart sich in

<sup>316</sup> Vgl. Einstein 2009, S. 6f.

<sup>317</sup> Vgl. ebd.

<sup>318</sup> Ebd.

<sup>319</sup> Maury *et al.*, „Wavelength-Frequency Relation“.

der zeitkritischen Auswahl von Längenverhältnissen, die erst hervorgehen, wenn der Raum ‚Phonautogramm‘ bewegt wird. Das sonische Signal via Phonautograph erzeugt so etwas wie Welt durch Kontinuität und grenzt sich durch folgende Definition vom bereits erschlossenen, diskontinuierlichen Signal ab:

*Das sonische Signal im Messmedium Phonautograph ist von durch den ‚Raum‘ gezeitigten Entscheidungslängen bestimmt und folglich an den ihn definierenden ‚Trägerraum‘ – das Phonautogramm – gekettet. Erst die Zeitigung des Signals durch den Raum erzeugt Relationen zwischen den Entscheidungslängen, die sich interpretieren lassen in Geschwindigkeit, Wellenlänge oder -anzahl. Information ist folglich eine Ordnung von räumlichen Längen. Das via Phonautograph offenbarte, sonische Signal besitzt die Fähigkeit Ordnung durch räumliche Längen auszudrücken. Kurz gesagt: **Der Raum zeitigt das Signal.***

Das durch den Raum gezeitigte sonische Signal kann ohne seinen definierenden Raum nicht existieren und unterscheidet sich damit drastisch vom Diskontinuierlichen. Letzteres kann losgelöst von seinem Trägerraum nahezu jegliche Form annehmen,<sup>320</sup> da der raumzeitlichen Relationsbildung die Erzeugung von Koordinaten im mikrotemporalen Prozess (wofür es schließlich einer ‚internen Systemclock‘ bedarf) vorausgeht. Im Unterschied dazu bleibt das kontinuierliche sonische Signal immer durch seinen Trägerraum bestimmt, da dieser – in Anlehnung an Heidegger – eng mit der Zeit verschmolzen ist.<sup>321</sup> Die ‚Unterjochung‘ des Signals durch den Raum wurde der Organisation *First Sounds* – dramatisch formuliert – zum Verhängnis, weshalb sich das folgende Beispiel als weitere Stütze der hier erbrachten Ansicht anbietet und den Abschluss dieses Kapitels einleitet.

Die Organisation um den Musikwissenschaftler Patrick Feaster und Sound-Historiker David Giovannoni nutzt Computertechnologie, um stillgegläubten Phonautogrammen zum Ertönen zu verhelfen. Doch selbst wenn die Aufzeichnungen Scott de Martinvilles einen als Spur aufgezeichneten ‚Time-Code‘ enthalten,<sup>322</sup> der eine annähernde Wiedergabetreue des bereits verflüchtigten sonischen Ereignisses ermöglicht, rekonstruierte Feaster *et al.* das Stück ‚Au Clair de la Lune‘ (April 9, 1860 [#36]) zunächst mit der falschen Geschwindigkeit: „Scott indirectly identifies himself as the

---

<sup>320</sup> Vgl. Watkinson 2001, S. 327.

<sup>321</sup> Vgl. Heidegger 1953, S. 417 ; vgl. Watkinson 2001, S. 327; Anm.: Eben deshalb kann es im Sinne Kittlers auch nicht ohne weiters manipuliert werden: „Bei einem kausalen System, das die Nachfolger Relationen zwischen allen Zeitpunkten  $t(n)$  bewahrt, hat kein Tonmeister die Möglichkeit, Teilsequenzen im Festwertspeicher Schallplatte zu löschen oder gegeneinander auszutauschen.“ (Kittler 1993, S. 189).

<sup>322</sup> Scott de Martinville gibt in *Certificat d'Addition* zwei Verfahren zur Zeitbestimmung und -messung an, die parallel zueinander genutzt wurden: Den von Herrn Rudier (Vorname unbekannt) entwickelten Chronometer, der durch eine Hemmung alle sechs Sekunden eine Markierung im Phonautogramm verzeichnet. (Vgl. Scott de Martinville 1857/ 1867/ 1878, S. 60f; vgl. Feaster 2010, S. 68) Laut Feaster wird seit 1859 neben dem Markier-Chronometer von Rudier eine Stimmgabel zur Zeiterfassung genutzt. (Vgl. ebd.) Scott de Martinville selbst rechnet diese Errungenschaft dem Konstrukteur für wissenschaftliche Präzisionsinstrumente Rudolph Koenig zu, der dem Phonautographen dazu verhelfen sollte, zu einem ernstzunehmenden Messinstrument innerhalb der Wissenschaft für Akustik zu werden. (Vgl. Scott de Martinville 1857/ 1867/ 1878, S. 55).

speaker, we realized that this speed was too fast, and that the frequency of Scott's reference tuning fork was actually 250 Hz."<sup>323</sup> Auch wenn Time-Axis-Manipulation nichts überraschend neues ist, bleibt dieses medienwissenschaftliche Phänomen nichtsdestotrotz relevant. Denn hierin ‚schlummert‘ ein Episteme des sonischen Signals: Zwar kann das Ablaufen der getroffenen Entscheidungslängen schnell oder langsam vollzogen werden; das Ordnungsverhältnis ändert sich dabei jedoch keineswegs. Auf Ebene der Information bleiben die raumzeitlichen Relation weiterhin bestehen.<sup>324</sup> Dies ist schließlich ein entscheidender Unterschied: Während sich dem sonischen Signal via Computer weitere Koordinaten hinzufügen bzw. entfernen lassen, wie etwa durch *AutoTune* Software,<sup>325</sup> ist dies im Falle des Messsystems Phonautograph nicht möglich.<sup>326</sup>

Das sonische Signal via Phonautograph hat sich als ein kontinuierliches offenbart, welches durch den Raum gezeitigt wird. Der Phonautograph präsentiert dem Subjekt so etwas wie Welt durch die raumzeitliche Relation von Entscheidungslängen, die sich schließlich als Wellenlänge oder -anzahl begreifen lassen.

---

<sup>323</sup> First Sounds, „Édouard-Léon Scott de Martinville's Phonautograms: Earlier Playbacks“.

<sup>324</sup> Vgl. Kittler 1993, S. 189.

<sup>325</sup> Vgl. Friedrich 2020, S. 166f.

<sup>326</sup> Vgl. Kittler 1993, S. 189.

---

## Ausklang

Das sonische Signal gibt es nicht. Abhängig vom techn(olog)ischen Messmedium offenbart sich ein sonisches Signal mal als diskontinuierliches, mit der Eigenschaft, Raum zu zeitigen; oder es tritt wellenförmig auf, kontinuierlich geprägt durch den Raum, der es zeitigt. Die Dualität des sonischen Signals entspringt folglich der Tatsache, dass ein sonisches Signalwesen nie ohne seinen techn(olog)ischen Messapparat begriffen werden kann. Ein solcher Dualismus ist seit der kanonischen Quantentheorie jedoch nichts Neues mehr. Was allerdings ein Novum ist, ist die medienwissenschaftliche Deutung und Differenzierung zweier Signalwesen, die beide die Berechtigung zur Erzeugung von so etwas wie Welt haben. Doch während bei dem einen das Natürliche bereits seit Jahrhunderten mitschwingt – im wahrsten Sinne des Wortes –, schämt sich – metaphorisch – das andere für seine Diskontinuität bis zum heutigen Tag.

Zu Beginn der Arbeit wurde im Kapitel PRÄPARATION die Basis geschaffen; eine Art sachgerechtes Präparieren von Epistemen, damit der wissenschaftliche Blick auf das fällt, was in dieser Arbeit von Relevanz ist. Zunächst fiel dieser auf das Signal als solches und dessen Fähigkeit zur Auswahl. Es ließ sich argumentativ herausarbeiten, dass erst die besorgte Zeit im Sinne Martin Heideggers eine Bildung von Information ermöglicht und damit als ordnungstiftend betrachtet wird. Mehr noch: Das Signal hat die Fähigkeit Information physisch auszudrücken und bildet daraus raumzeitliche Relationen, die laut Alfred N. Whitehead notwendig sind, wenn Subjekt sich so etwas wie Welt überhaupt erschließen will. Im Anschluss folgte eine Untersuchung des Messakts als solchem und dessen Repräsentation, die schließlich so etwas wie Welt für das Subjekt raumzeitlich greifbar macht. Während zunächst die Messung als eine dargestellte Performance im Sinne von Davis Baird eingeordnet wurde, kristallisierte sich anschließend am Beispiel des Doppelspaltexperiments heraus, dass eine jede Messung durch ihre Anordnung bzw. den Apparat determiniert ist: Bis zur Messung lässt sich keine Aussage über die Eigenschaft eines Objekts von Interesse, dem Licht oder dem Sound, treffen. Damit ist das relationsbildende Signal abhängig vom techn(olog)ischen Messmedium, das so etwas wie Welt schließlich in der einen oder anderen Weise darstellt, was im darauffolgenden Kapitel tiefer thematisiert wurde.

Im Kapitel ENTSCHEIDUNG sollte der Frage nachgegangen werden, wie sich ein Objekt von Interesse durch Messung als kontinuierliche Welle oder diskontinuierliches Teilchen darstellt, also ‚Wie wird was gemessen?‘. Es ließ sich zeigen, dass sich so etwas wie Welt nicht schlichtweg offenbart, sondern durch die Entscheidung – also die Wahl der Messapparatur – vom Subjekt bestimmt ist. Demnach ist mit dem techn(olog)ischen Gerät bereits vor dem eigentlichen Messakt eine bestimmte Fragestellung ausgewählt, nämlich die Frage nach Ort oder Impuls bzw. Geschwindigkeit eines zu messenden Forschungsgegenstandes. Ausgehend von Werner Heisenbergs Unschärferelation, welche besagt, dass mit der Steigerung der Ortskenntnis die Kenntnis der Bewegung abnimmt und vice versa, führte eine medienwissenschaftliche Deutung der Quantentheorie letztendlich zum ‚medientechn(olog)ischen Unbestimmtheitsprinzip‘, das Medienkörper in ortsmessende oder impuls-messende Apparate trennt. Mittels aus

der Geschlechterforschung entliehener Theorien ließ sich aufzeigen, dass ein jeder Apparat zwar einen objektiven Körper (sex) besitzt, doch dieser von Diskursen (gender) durchsetzt ist. Auch wenn laut Karen Barad der techn(olog)ische Körper ebenso Diskurse schafft, bleibt ein vom Subjekt losgelöstes Messmedium im Sinne Shintaro Miyazakis nur eine Illusion, womit die Entscheidung von so etwas wie Welt nie ohne den Menschen gedacht werden kann, da dieser seine in Diskursen verhafteten Axiome mit zu der Rechnung beisteuert. Nichtsdestotrotz legitimierte die in diesem Kapitel herausgearbeitete, medienwissenschaftliche Deutung eine konkrete Beschreibung des sonischen Signals via Computer und Phonautograph, da das medientechn(olog)ische Unbestimmtheitsprinzip dem Medienkörper das Recht der Darstellung von so etwas wie Welt im Sinne Friedrich A. Kittlers zuspricht und dies nicht allein dem Subjekt überlässt. Oder kurz: So etwas wie Welt liegt diskontinuierlich wie auch kontinuierlich vor.

Im Sinne des Titels des letzten Kapitels PRÄSENTATION wurde ganz konkret anhand zweier Messsysteme das sonische Signal einmal als ein kontinuierliches und einmal als diskontinuierliches präsentiert, womit schließlich THE DUALITY OF SOUND ihr volles medienwissenschaftliches Potential entfalten konnte. Die zwei gewählten Messsysteme hätten dabei in Bezug auf ihre Historie nicht weiter auseinander liegen können: Der Computer, mit dessen  $\Sigma\Delta$ -Analog-to-Digital Converter (ADC) als technologischer Extremität, versus Phonautograph und -gramm. Unbeeindruckt von der historischen Differenz der Artefakte offenbarten sich nichtsdestotrotz zwei klar zu unterscheidenden Wesenszüge des sonischen Signals. Das eine Signalwesen erzeugt via Computer eine diskontinuierliche Repräsentation von so etwas wie Welt und entspricht damit einer Ortsbestimmung – in diesem Fall, der Position der Mikrofonmembrane in der -kapsel. Im Prozess der  $\Sigma\Delta$ -Modulation und dem anschließenden Digitalfilter – hier der FIR – wird sich der Zeit zunächst entledigt, die dann mikrotemporal eine Koordinate informiert, welche wiederum makrotemporal zu raumzeitlichen Relationen führt. Kurz gesagt: Das Signal zeitigt den Raum. Es ist schließlich die Repräsentation von einzelnen Koordinaten, die es Software wie etwa *AutoTune* ermöglicht, makrotemporal einzuwirken. Doch damit nicht genug: Es ließ sich zeigen, dass das Quantisierungsrauschen kein Rauschen im Sinne eines Fehlers ist, sondern es sich vielmehr um ‚*quantization uncertainty*‘ handelt – die hörbare Unschärfe der Natur. Im Unterschied dazu findet im Messakt des Phonautographen eine Bestimmung der Membranbewegung statt. Es zeigte sich, dass sich das sonische Signal via Phonautograph erst aus der Zeitigung des Raumes heraus ergibt. Der Raum zeitigt hier das Signal. Das sonische Signal ist an sein Trägerraum gekettet; die raumzeitlichen Relationen lassen sich nicht manipulieren.

Die Dualität des Sounds drückt sich schließlich in den unterschiedlichen Signalwesen aus, die durch ihre techn(olog)ischen Messkörper (sex) definiert sind und dem Subjekt so etwas wie Welt (gender) als raumzeitliche Relation bereitstellt. Und damit kann diese Arbeit auch als ein Anfang gewertet werden, der das Ende einer mühseligen Debatte über die Differenzierung zwischen digital vs. analog einläutet, die nun gleichwertig und hierarchisch befreit betrachtet werden müssen. Nach der hier postulierten Ansicht sind

Terminologien aus diesem Diskurs nicht nur neu auszuhandeln, sondern sollten immer medientechn(olog)isch geerdet und unter Berücksichtigung des Subjekts begriffen werden. Denn Definitionen wie die des analogen oder digitalen Signals sind selbst von Diskursen ummantelt und versperren nicht nur den wissenschaftlichen Blick, sie führen auch zu falschen Konzepten, wie etwa dem Aanalogue-zu-Digital **Wandler** – um nur eines der offensichtlichen Beispiele zu nennen. Mehr noch: Sie verwehren durch ihr ungleichmäßiges Verhältnis dem diskontinuierlichen Signal seine Natürlichkeit; erlauben nicht mal das Denken an eine diskrete Darstellung von so etwas wie Welt.<sup>327</sup> Des Weiteren schließt sich daran eine ‚Neuaufgabe‘ bzgl. Kittlers Unterscheidung zwischen ‚realer‘ Schallwelle und ‚symbolischem‘ Computercode. Denn wie gezeigt wurde, repräsentiert auch der Computer ein sonisches Signal realweltlich, weshalb vermutet werden darf, dass es realweltlichen Code und symbolischen Code geben müsste – zumindest sollte dies nicht mehr allzu paradox klingen, wie es vermutlich vor der Arbeit der Fall war.

Des Weiteren bietet die Dualität des Sounds eine Grundlage zur neurologischen Erforschung der Informationsverarbeitung an; genauer gesagt, eine Clock im Subjekt im Sinne des Psychologen Wilhelm Wundts ist möglicherweise ähnlich dem ‚Technologos‘ des  $\Sigma\Delta$ -ADCs denkbar. Bereits 1911 hebt Wundt in *Einführung in die Psychologie* hervor, dass „unser Bewußtsein [...] rhythmisch angelegt [ist].“<sup>328</sup> Wundt erklärt dies auf Basis rhythmisch organisierter Organe, wie etwa der Herzbewegung, was hier jedoch nicht gemeint ist.<sup>329</sup> Stattdessen ist vielmehr die Idee einer inneren Clock gemeint, also einem ordnungstiftenden Takt, der Information ausbildet und makrotemporal eine Zeitlichkeit von ‚jetzt, dann, damals‘ provoziert. Wundts Vorstoß ließe sich damit auf Basis der hier erbrachten Erkenntnisse medientheoretisch erden: Denn durch die Erforschung des sonischen Signals via Computer ging nicht nur ein diskontinuierliches Signalwesen hervor, welches aus einzelnen Bits im Mikrotemporalen erst Koordinaten schafft und dann im Makrotemporalen raumzeitliche Relation bildet. Es zeigte sich außerdem, dass erst die Clock des Systems zur Informationsbildung beiträgt, da sich im Rahmen der Ortsbestimmung der Membranposition zuvor der Zeit entledigt wurde – ohne eine interne Clock, wäre eine Relationsbildung also undenkbar. Wird die Funktionsweise der Cochlea näher betrachtet, bildet sich eine Analogie zwischen dieser und  $\Sigma\Delta$ -ADC. Demnach lässt sich vermuten, dass die tonotopisch<sup>330</sup> angelegte Basilarmembran der

<sup>327</sup> Der Medienwirtschaftler Wolfgang Hagen (ver)sucht in *Es gibt kein digitales Bild* (2004) ebenfalls einen quantentheoretischen Ansatz zu verfolgen, um das digitale Bild zu begreifen. Auch wenn er aufzeigt, dass es sich beim CCD-Ship um eine Verortung von Elektronen handelt (Vgl. Hagen 2004, S. 6), hängt sich seine Beschreibung an der Stochastik auf. (Vgl. ebd., S. 12ff) Damit unterschlägt er die durch Eichhorn und Wetterich erwähnte Unschärfe der Natur, die der Ortsbestimmung inhärent ist, und argumentiert im Sinne einer klassischen Physik, dass jenes digitale Bild nur eine Chance von Bild ist (Vgl. ebd., S. 13). Zwar behält es im Sinne der vorliegenden Arbeit seine Richtigkeit, dass das digitale Bild eine Datenstruktur ist (vgl. ebd.), doch fehlt es einem Kurzschluss zwischen Datenwort und physikalischem Ort des Registrierungsobjektes, was zu einer These führt, die spätestens mit der vorliegenden Arbeit kritisiert werden muss.

<sup>328</sup> Wundt 1911, S. 3.

<sup>329</sup> Vgl. ebd., S. 3f.

<sup>330</sup> „The most obvious and possibly most fundamental organizing principle of the auditory system is tonotopy, an orderly representation of sound frequency across a one-dimensional space.“ (Camalier & Kaas 2011, ch9\_sec4).

Cochlea die Wanderwelle ähnlich dem  $\Sigma\Delta$ -ADC analysiert.<sup>331</sup> Die Position des Trommelfells wird zeitkritisch durch die drei unterschiedlich erregbaren Typen von Haarsinneszellen<sup>332</sup> im Corti-Organ als Informationsintensität zusammengefasst, dessen Erregungsverhältnisse wiederum im Gehirn durch synchronisierte Clocks als Koordinate ausgedrückt wird und zu raumzeitlichen Relationen führt.<sup>333</sup> „This element of parallel processing is one of the hallmarks of the auditory system and is an architecture best suited to processing stimuli that occur on a very fast timescale, as in audition.“<sup>334</sup> In Anlehnung an die Blut-Hirn-Schranke<sup>335</sup> ließe sich bei dieser Hypothese von einer Zeit-Hirn-Schranke sprechen, womit einem jeden Subjekt zur Verarbeitung eingehender, sonischer Signale seine eigene ordnungsbildende Zeit zugesprochen werden müsste.<sup>336</sup> Information müsste dann in extern und intern unterschieden werden. Dies ist jedoch nur denkbar, wenn das sonische Signal losgelöst vom homologen Axiom des Kontinuierlichen ist.

THE DUALITY OF SOUND zeigt, dass Medientheorie nicht einfach nur über Medien schreibt, sondern ebenso das eigentliche Potenzial dieser aufspürt und dieses zukunftsfruchtig mit Forschenden aller Disziplinen teilt. Und da so etwas wie Welt eben auch immer mit den Messmedien verschränkt ist, muss Medienwissenschaft im Sinne von Wolfgang Ernst und Karen Barad techn(olog)isch sowie geistig begriffen werden. THE DUALITY OF SOUND entspringt deshalb nicht nur einem durch Medientheorie eingefangenen, interdisziplinären Forschungsansatz; es ist eine Arbeit für weitere Episteme außerhalb ihrer eigenen Disziplin. Folglich lassen sich die hier erwähnten Aussichten lediglich als Appetizer betrachten, die sich ähnlich dem hier besprochenen Signalwesen erst aus einer tatsächlichen Forschung heraus ergeben.

---

<sup>331</sup> Vgl. Ellermeier & Hellbrück 2008, S. 48ff; vgl. Camalier & Kaas 2011, ch9\_sec4; Encke *et al.* 2016, S. 810ff.

<sup>332</sup> Im Grunde gibt es drei Typen von Haarsinneszellen, die je nach Stimulation feuern oder nicht. (Vgl. Encke *et al.* 2016, S. 811f) Während der eine Typus bereits ohne Erregung durch die Wanderwelle feuert – Stichwort ‚thermisches Rauschen‘ – besitzt ein anderer Typus eine maximale Grenze bei etwa 120 dB. (Vgl. ebd.)

<sup>333</sup> Vgl. Camalier & Kaas 2011, ch9\_sec4; Encke *et al.* 2016, S. 810ff.

<sup>334</sup> Camalier & Kaas 2011, ch9\_sec4.

<sup>335</sup> „The BBB [*blood-brain barrier*] is a highly specialized structure formed by a tight monolayer of brain endothelial cells, which maintain bloodstream cells, neurotoxic compounds, and microorganisms outside of the CNS.“ (Barichello *et al.* 2019, S. 4).

<sup>336</sup> Es gilt zu beachten, dass die Clock nicht gleichzusetzen ist mit dem Zeitsinn, den unter anderem der Mediziner Michael Ejner untersuchte und zu dem Schluss kam, dass die Zeitbestimmung vom Zustand des Bewusstseins abhängig ist, was schließlich einen Zeitsinn zu Nichte macht. (Vgl. Ejner 1889, S. 42).



---

## Literaturverzeichnis

- Ananthaswamy, Anil, „Quantenmechanik. Kein Ausweg aus der Unwirklichkeit“, in: *Spektrum der Wissenschaft* Vol. 12 (2018), S. 12–9.
- Anonymous, „Heisenbergsche Unschärferelation“, veröffentlicht durch *Spektrum Akademischer Verlag* in *Lexikon der Physik* (1998), URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/heisenbergsche-unschaerferelation/6530> (Stand: 19.12.2020).
- Anonymous, „Plancksches Wirkungsquantum“, veröffentlicht durch *Spektrum Akademischer Verlag* in *Lexikon der Physik* (1998), URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/plancksches-wirkungsquantum/11310> (Stand: 02.03.2021).
- Anonymus, „Sigma-Delta ADCs and DACs“ [AN-283 Application Note], veröffentlicht durch *Analog Devices* in Norwood, MA., Datum unbekannt, Seitenangaben beziehen sich auf das PDF Dokument, URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/292524291525717245054923680458171AN283.pdf> (Stand: 19.01.2021).
- Arnheim, Rudolf, *Entropie und Kunst. Ein Versuch über Unordnung und Ordnung* [1971], Köln: DuMont, 1979.
- Arrangoiz-Arriola, Patricio / E. Alex Wollack / Zhaoyou Wang / Marek Pechal / Wentao Jiang / Timothy P. McKenna / Jeremy D. Witmer / Raphaël Van Laer & Amir H. Safavi-Naeini, „Resolving the energy levels of a nanomechanical oscillator“, in: *Nature* 571 (2019), S. 537–40.
- Aziz, Pervez M./ Henrik V. Sorensen/ Jan Van der Spiegel, „An Overview of Sigma-Delta Converters. How a 1-bit ADC achieves more than 16-bit resolution“, in: *IEEE Signal Processing Magazine* Vol. 13/1 (September 1996), S. 61–84.
- Baird, Davis, *Thing Knowledge. A Philosophy of Scientific Instruments*, Berkeley; Los Angeles; London: University of California Press, 2004.
- Barad, Karen, *Meeting the Universe Halfway. Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*, London; Durham: Duke UP, 2007.
- Barichello, Tatiana / Allan Collodel, Rodrigo Hasbun & Rodrigo Morales, „An Overview of the Blood-Brain Barrier“, in: *Blood-Brain Barrier*, hrsg. v. Tatiana Barichello, New York: Humana Press, 2019, S. 1–8.
- Bense, Max, *Aesthetica. Einf. in d. neue Aesthetik* [1965], Baden-Baden: Agis, 1982.
- Bense, Max, „Technische Existenz“, in: *Ausgewählte Schriften Band 3. Ästhetik und Texttheorie*, hrsg. v. Elisabeth Walther, Stuttgart; Weimar: J.B. Metzler, 1998, S. 122–46.
- Böhme, Johann F., *Stochastische Signale. Eine Einführung in Modelle, Systemtheorie und Statistik*, Wiesbaden: Springer, 1993.

- Brücke, E. / K. J. Schulze, „Das Goldschlägerhäutchen“, in: *Kolloid-Zeitschrift* Vol. 165/2 (1959), S. 143–8.
- Bogert, Bruce P. / M. J. R. Healy / John W. Turkey, „The Querfrenquy Alanysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking“, in: *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis*, hrsg. v. Murray Rosenblatt, 1963, S. 209–43.
- Buchhaupt, Siegfried, „Die Bedeutung der Nachrichtentechnik für die Herausbildung eines Informationskonzeptes der Technik im 20. Jahrhundert“, in: *Technikgeschichte* Vol.70/4 (2003), S. 277–98.
- Butler, Judith, *Gender Trouble. Feminism and the Subversion of Identity*, London; New York: Routledge, 1990.
- Butler, Judith, *Bodies That Matter. On the Discursive Limits of „Sex“*, London; New York: Routledge, 2011.
- Camalier, Corrie R./ Jon H. Kaas, „Sound“, in: *Neurobiology of Sensation and Reward*, J. A. Gottfried (Hg.), Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis, 2011, URL: [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK92785/#ch9\\_sec4](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK92785/#ch9_sec4).
- Chapman, Michael S./ Troy D. Hammond/ Alan Lenef/ Jörg Schmiedmayer/ Richard A. Rubenstein/ Edward Smith/ David E. Pritchard, „Photon Scattering from Atoms in an Atom Interferometer: Coherence Lost and Regained“, in: *Phys. Rev. Lett.* 75 (November 1995), S. 3783–7.
- Cheok, Adrian David (Hg.) / Kate Devlin (Hg.) / David Levy (Hg.), *Love and Sex with Robots. Second International Conference, LSR 2016 London, UK, December 19–20, 2016 Revised Selected Papers*, Cham: Springer, 2017.
- Coy, Wolfgang, *Aufbau und Arbeitsweise von Rechenanlagen. Eine Einführung in Rechnerarchitektur und Rechnerorganisation für das Grundstudium der Informatik*, Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1988.
- Czapor, Pawel, „Sigma-Delta ADC Clocking. More Than Jitter“, in: *Analog Dialog* Vol. 53/2 (April 2019), S. 9–16.
- De Broglie, Louis, „The Wave Nature of the Electron. Nobel Lecture, December 12, 1929“, veröffentlicht auf der Webseite der *The Nobel Foundation*, 2018, S. 244–56, URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/broglie-lecture.pdf> (Stand: 30.12.2020).
- Denning, Peter J. / Matti Tedre, *Computational Thinking*, Cambridge, MA; London: MIT Press, 2019.
- Eckl, Rainer / Leonhard Pütgens / Jürgen Walter, *A/D- und D/A-Wandler. Grundlagen, Prinzipschaltungen und Applikationen*, München: Franzis, 1990.
- Eddington, Arthur S., *The Nature of the Physical World*, Cambridge: University Press; New York: Macmillan, 1927.

- Edwards, Paul N., „Infrastructure and Modernity: Force, Time, and Social Organization in the History of Sociotechnical Systems,” in: *Modernity and Technology*, hrsg. von Thomas J. Misa, Philip Brey und Andrew Feenberg, Cambridge, Mass.: MIT Press, 2003, 185–225.
- Eichhorn, Astrid / Christof Wetterich, „Quantengravitation. Die Zählung des unendlichen“, in: *Spektrum der Wissenschaft* Vol. 2 (2019), S. 12–21.
- Eidenmüller, Dirk, „Und noch ein Schlupfloch erfolgreich geschlossen“, in: *Quantenphysik. Spukhafte Welt zwischen Wellen und Teilchen*, veröffentlicht durch *Spektrum der Wissenschaft Kompakt* am 13.05.2015 (Digitalversion), S. 4–7.
- Einstein, Albert, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Berlin; Heidelberg: Springer, <sup>24</sup>2009.
- Ejner, Michael, *Experimentelle Studien über den Zeitsinn*, Dorpat: Schnakenburg 1889.
- Ellermeier, Wolfgang / Jürgen Hellbrück, „Hören. Psychoakustik. Audiologie“, in: *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. v. Stefan Weinzierl, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, S. 41–85.
- Encke, J./ J. Kreh/ F. Völk/ W. Hemmert, „Codierung von Schallsignalen in Aktionspotenziale des auditorischen Nerven“, in: *HNO* 64 (2016), S. 808–14.
- Ernst, Wolfgang, *Medienwissen(schaft) zeitkritisch. Ein Programm aus der Sophienstraße*, Antrittsvorlesung (21.10.2003), hrsg. von Jürgen Mlynek, Berlin: Humboldt-Universität, 2004a.
- Ernst, Wolfgang, „Den A/D-Umbruch aktiv denken. Medienarchäologisch, kulturtechnisch“, in: *Analog/Digital - Opposition oder Kontinuum?: Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, hrsg. v. Jens Schröter u. Alexander Böhnke, Transcript: Bielefeld, 2004b, S.49–65.
- Ernst, Wolfgang, „ ‚Merely the Medium‘? Die operative Verschränkung von Logik und Materie“, in: *Was ist ein Medium?*, hrsg. v. Stefan Münker & Alexander Roesler, Frankfurt a. M. : Suhrkamp, 2008, S. 158–84.
- Ernst, Wolfgang, *Gleichursprünglichkeit. Zeitwesen und Zeitgegebenheit von Medien*, Berlin: Kulturverl. Kadmos, 2012a (Berliner (Programm) einer Medienwissenschaft, Bd. 11).
- Ernst, Wolfgang, *Chronopoetik. Zeitweisen und Zeitgaben technischer Medien*, Berlin: Kulturverl. Kadmos, 2012b (Berliner (Programm) einer Medienwissenschaft, Bd. 11).
- Ernst, Wolfgang, *Im Medium erklingt die Zeit. Technologische Tempor(e)alitäten und das Sonische als ihre privilegierte Erkenntnisform*, Berlin: Kulturver. Kadmos, 2015.
- Ernst, Wolfgang, „ ‚Electrified Voices‘. Non-Human Agencies of Socio-Cultural Memory“, in: *Memory in Motion. Archives, Technology, and the Social*, hrsg. von Ina Blom/ Trond Lundemo/ Eivind Røssaak, Amsterdam: Amsterdam University Press, 2016, S. 41–59.

- Ernst, Wolfgang, *The Delayed Present: Media-Induced Tempor(e)alities & Techno-traumatic Irritations of „the Contemporary“*, Berlin: Sternberg Press, 2017.
- Ernst, Wolfgang, „Harte Arbeit am Begriff: Medienarchäologische Antworten auf die Frage nach der Technologie“, in: *Mechane* (2020), S. 107–32.
- Feaster, Patrick, „Édouard-Léon Scott de Martinville. An Annotated Discography“, in: *Association for Recorded Sound Collections* Vol. 41/1 (2010), S. 43–82.
- Feaster, Patrick, „Daguerreotyping the Voice: Léon Scott’s Phonautographic Aspirations“, veröffentlicht auf *Griffonage-Dot-Com. Patrick Feaster’s Explorations in Historical Media* am 23.04.2017, URL: <https://griffonagedotcom.wordpress.com/2017/04/23/daguerreotyping-the-voice-leon-scotts-phonautographic-aspirations/> (Stand: 22.02.2021).
- First Sounds, „The Phonautograms of Édouard-Léon Scott“, veröffentlicht durch *FirstSounds.org* zwischen 2007–2009, URL: <http://www.firstsounds.org/sounds/scott.php> (Stand: 13.11.19).
- First Sounds, „Édouard-Léon Scott de Martinville's Phonautograms: Earlier Playbacks“, *FirstSounds.org* zwischen 2007–2009, URL: <http://www.firstsounds.org/sounds/earlier-playback.php#auclair> (Stand: 03.04.2018).
- Firyn, Alexander, „Gegen die Zeit“, in: *Zeitkritische Medien*, Axel Volmar (Hg.), Berlin: Kulturverl. Kadmos, 2009 (Berliner (Programm) einer Medienwissenschaft, Bd. 5), S. 299–306.
- Fischer, Lars, „Quantenakustik. Wie man Schall-Teilchen zählt“, veröffentlicht durch *Spektrum Akademischer Verlag* am 25.07.2019, URL: <https://www.spektrum.de/news/wie-man-schall-teilchen-zaehlt/1661988> (Stand: 02.03.2021).
- Frenkel, Jakow I., *Einführung in die Wellenmechanik*, Berlin: Springer, 1929.
- Frenkel, Jakow I., *Wave Mechanics. Advanced General Theory*, Oxford: Clarendon, 1934.
- Friedrich, David, *PAY. PLAY. REPEAT. Die medienkulturelle Zeitgestalt des Münzphonographen in den USA, 1889–1896*, Bachelor-Arbeit an der Humboldt Uni. z. Berlin 2018, URL: <http://edoc.hu-berlin.de/18452/20280> (Stand: 25.11.2019).
- Friedrich, David, „Xenodigital Storage. Zu Gast im fremden System“, bereitgestellt durch den Lehrstuhl *Medientheorien* an der Humboldt Uni. z. Berlin 2019, URL: [https://www.musikundmedien.hu-berlin.de/de/medienwissenschaft/medientheorien/hausarbeiten\\_essays/pdfs/xenodigital-storage.pdf](https://www.musikundmedien.hu-berlin.de/de/medienwissenschaft/medientheorien/hausarbeiten_essays/pdfs/xenodigital-storage.pdf) (Stand: 10.07.2020).
- Friedrich, David, „Cyborg Voice – Der Auto-Tune Effekt als Klangästhetik des Humanoiden. Ein medienarchäologisches Statement“, in: *Wissen im Klang. Neue Wege der Musikästhetik*, hrsg. v. José Gálvez, Jonas Reichert & Elizaveta Willert, Bielefeld: Transcript, 2020, S. 163–78.

- Gabor, D., „Acoustical Quanta and the Theory of Hearing“, in: *Nature* Vol. 159 (1947), S. 591–4.
- Goodman, David J., „The Application of Delta Modulation to Analog-to-PCM Encoding“, *The Bell System Technical Journal* Vol. 48/2 (1969), S. 321–43.
- Großmann, Rolf, „Phonographic Work: Reading and Writing Sound“, in: *Sound As Popular Culture. A Research Companion*, hrsg. von Jens G. Papenburg und Holger Schulze, Cambridge, MA: MIT Press, 2016, S. 355–66.
- Günther, Helmut, *Grenzgeschwindigkeiten und ihre Paradoxa. Gitter, Äther, Relativität*, Stuttgart; Leipzig: Teubner, 1996.
- Hagen, Wolfgang, „Es gibt kein digitales Bild. Eine medienepistemologische Anmerkung“, vorgestellt auf dem Symposium *Digitale Bildverarbeitung, eine Erweiterung oder radikale Veränderung der Fotografie?* (2. & 13. November 2004) im Museum Folkwang in Essen, veröffentlicht durch den Autor auf dessen Webseite, URL: [http://whagen.de/PDFS/11017\\_HagenEsgibtkeindigital\\_2004.pdf](http://whagen.de/PDFS/11017_HagenEsgibtkeindigital_2004.pdf) (Stand: 31.03.2021).
- Hansen, Mark B. N., „Medien des 21. Jahrhunderts, technisches Empfinden und unsere originäre Umweltbedingung“, in: *Die technologische Bedingung. Beiträge zur Beschreibung der technischen Welt*, hrsg. v. Erich Hörl, Berlin: Suhrkamp, 2011, S. 365–409.
- Haraway, Donna, „Geschlecht, Gender, Genre. Sexualpolitik eines Wortes“, in: *Monströse Versprechen. Die Gender- und Technologie-Essays* [1995], Hamburg: Argument, 2017, S. 203–20.
- Hartley, Ralph V.L., „Transmission of Information“, in: *Bell System Technical Journal* Vol. 7 (Juli 1928), S. 535–63.
- Hayles, N. Katherine, *How We Became Posthuman. Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, Chicago; London: Uni. of Chicago Press, 1999.
- Heidegger, Martin, *Sein und Zeit* [1927], Tübingen: Max Niemeyer, 1953.
- Heisenberg, Werner, „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“, in: *Zeitschrift für Physik* Vol. 43 (1927), S. 172–98.
- Heisenberg, Werner, „Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie“, in: *Quantentheorie und Philosophie. Vorlesungen und Aufsätze*, hrsg. v. Jürgen Busche, 1979a, Stuttgart: Reclam, S. 42–61.
- Heisenberg, Werner, „Die Geschichte der Quantentheorie“, in: *Quantentheorie und Philosophie. Vorlesungen und Aufsätze*, hrsg. v. Jürgen Busche, 1979b, Stuttgart: Reclam, S. 3–21.
- Hermann, Kopetz, „Signale“, Vorlesungsskript zu Digital Signal Processing (WS 2010/2011), bereitgestellt von der *TU Wien*, URL: <https://ti.tuwien.ac.at/cps/teaching/courses/dspv/files/Signale.pdf> (Stand: 12.01.2021).

- Hermann, Kopetz, „Signalabtastung“, Vorlesungsskript zu Digital Signal Processing (WS 2010/2011), bereitgestellt von der *TU Wien*, URL: <https://ti.tuwien.ac.at/cps/teaching/courses/dspv/files/abtasttheorem.pdf> (Stand: 12.01.2021).
- Holzner, Steven, *Quantenphysik für Dummies*, Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
- Kay, Lily E., *Das Buch des Lebens. Wer schrieb den genetischen Code?*, München; Wien: Carl Hanser Verl., 2001.
- Kayser, Rainer, „Einsteins unbemerkte Revolution“ [2012], in: *Quantenphysik. Spukhafte Welt zwischen Wellen und Teilchen*, veröffentlicht durch *Spektrum der Wissenschaft Kompakt* am 13.05.2015 (Digitalversion), S. 59–62.
- Keller, Andres, *Breitbandkabel und Zugangsnetze: technische Grundlagen und Standards*, Berlin; Heidelberg: Springer, <sup>2</sup>2011.
- Kester, Walt/ Dan Sheingold/ James Bryant, „Coding and Quantizing“, in: *Data Conversion Handbook. Analog Devices*, Walter Kester (Hg.), Amsterdam; Boston: Elsevier; Newnes, 2005, S. 57–72.
- Kester, Walt „Sampling Theory“, in: *Data Conversion Handbook. Analog Devices*, Walter Kester (Hg.), Amsterdam; Boston: Elsevier; Newnes, 2005, S. 73–82.
- Kester, Walt/ James Bryant, „Sigma-Delta Converters“, in: *Data Conversion Handbook. Analog Devices*, Walter Kester (Hg.), Amsterdam; Boston: Elsevier; Newnes, 2005, S. 231–54.
- Kittler, Friedrich A., *Grammophon. Film. Typewriter*, Berlin: Brinkmann u. Bose, 1986.
- Kittler, Friedrich A., „Real Time Analysis, Time Axis Manipulation“, in: *Draculas Vermächtnis. Technische Schriften*, Leipzig: Reclam, 1993, S. 182–207.
- Kittler, Friedrich A., *Aufschreibesysteme 1800/1900*, München: Fink, <sup>3</sup>1995.
- Knerr, Richard, *Lexikon der Mathematik*, Stuttgart: Deutscher Bücherbund, 1977.
- Krämer, Sybille, „Das Medium als Spur und als Apparat“, in: *Medien. Computer. Realität. Wirklichkeitsvorstellungen und Neue Medien*, hrsg. v. Sybille Krämer, Frankfurt a.M.: Suhrkamp, <sup>2</sup>2000, S. 73–94.
- Kuypers, Friedhelm, *Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Bd. 2., Elektrizität, Optik und Wellen*, Weinheim: Wiley-VCH-Verl., <sup>3</sup>2012.
- Lacan, Jacques, „Psychoanalyse und Kybernetik oder von der Natur der Sprache“ [1955], in: *Das Ich in der Theorie Freuds und in der Technik der Psychoanalyse. Das Seminar von Jacques Lacan. Buch II (1954–1955)*, Weinheim; Berlin :Quadriga, <sup>2</sup>1991, S. 373–90.
- Lambert, Mel, „Digital Audio Interfaces“, in: *J. Audio Eng. Soc.* Vol.38/9 (September 1990), S. 681–4, 686, 688, 690, 692, 694, 696.

- Lerch, Alexander/ Stefan Weinzierl, „Digitale Audiotechnik. Grundlagen“, in: *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. v. Stefan Weinzierl, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, S.785–811.
- Lindner, Jürgen, *Informationsübertragung. Grundlagen der Kommunikationstechnik*, Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005.
- Loriferne, Bernard, *Analog-Digital and Digital-Analog Conversion* [1976], London; Philadelphia; Rheine Heyden, 1982.
- Loy, Gareth, *Musimathics. The Mathematical Foundations of Music. Volume 1*, Cambridge, MA; London: MIT Press, 2006.
- Magnusson, Thor, *Sonic Writing. Technologies of Material, Symbolic & Signal Inscriptions*, New York; London: Bloomsbury Academic, 2019.
- Maury C., M. C. M. Wright, P. A. Nelson, „The Nature of Waves“, in: *ISVR Teaching Material on Waves and Acoustics*, veröffentlicht durch *Institute of Sound and Vibration Research (ISVR)* an der University of Southampton, URL: [http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial\\_files/Web-basics-nature.htm](http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-basics-nature.htm) (Stand: 13.11.2020).
- Maury C., M. C. M. Wright, P. A. Nelson, „Wavelength-Frequency Relation“, in: *ISVR Teaching Material on Waves and Acoustics*, veröffentlicht durch *Institute of Sound and Vibration Research (ISVR)* an der University of Southampton, URL: [http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial\\_files/Web-basics-frequency.htm](http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-basics-frequency.htm) (Stand: 13.11.2020).
- Michelson, A. A. / F. G. Pease / F. Pearson, „Measurement of the Velocity of Light In a Partial Vacuum“, in: *Astrophysical Journal* Vol. 82 (1935), S. 26–61.
- Miyazaki, Shintaro, *Algorythmisiert. Eine Medienarchäologie digitaler Signale und (un)erhörter Zeiteffekte*, Berlin: Kulturverl. Kadmos, 2013 (Berliner (Programm) einer Medienwissenschaft, Bd. 12).
- Miyazaki, Shintaro, „Solidarity-Driven Media Ironism and the Future Architect-Hacker-Citizen. A Provocation Piece“, in: *Contour* Vol. 6 (2020), S. 1–7, URL: <http://contourjournal.org/index.php/contour/article/view/media-ironism/196> (Stand: 03.02.2021).
- Moles, Abraham A., *Informationstheorie und ästhetische Wahrnehmung*, Köln: DuMont Schauberg, 1971.
- Moles, Abraham A., *Kunst & Computer*, hrsg. v. Hans Ronge, Köln: DuMont Schauberg, 1973.
- Müller, Andreas, „Teilchen“, veröffentlicht durch *Spektrum Akademischer Verlag* in *Lexikon der Astronomie* (2007–2014), URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/teilchen/480> (Stand: 19.12.2020).
- Münster, Gernot, *Quantentheorie*, Berlin/München/Boston: De Gruyter, 2020.

- Neumann, John von, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* [1932], Berlin; Heidelberg, <sup>2</sup>1996.
- Newton, Isaac, *Newton's Principia. The Mathematical Principles of Natural Philosophy* [1687], New York: D. Adee, 1846.
- Nünning, Ansgar, „Vielfalt der Kulturbegriffe“, in: Kulturelle Bildung, veröffentlicht am 23.07.2009 von: Bundeszentrale für politische Bildung, URL: <http://www.bpb.de/gesellschaft/kultur/kulturelle-bildung/59917/kulturbegriffe?p=all> (Stand: 20.06.2019).
- Pauli, Wolfgang, „Die allgemeine Prinzipien der Wellenmechanik“, in: *Quantentheorie*, hrsg. v. A. Smekal, Berlin; Heidelberg: Springer, 1933, S. 83–272.
- Pavan, Shanthi / Richard Schreier/ Gabor C. Temes, *Understanding Delta-Sigma Data Converters*, Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, <sup>2</sup>2017.
- Pflüger, Jörg, „Wo die Quantität in Qualität umschlägt. Notizen zum Verhältnis von Analogem und Digitalem“, in: *HyperKult II. Zur Ortsbestimmung Analoges Und Digitaler Medien*, hrsg. v. Martin Warnke, Wolfgang Coy & Georg Christoph Tholen, Bielefeld: Transcript, Vorab-Version, 2005, S. 19–87.
- Pias, Claus, „Time of Non-Reality. Miscellen zum Thema Zeit und Auflösung“, in: *Zeitkritische Medien*, Axel Volmar (Hg.), Berlin: Kulturverl. Kadmos, 2009 (Berliner (Programm) einer Medienwissenschaft, Bd. 5), S. 267–79.
- Rechenberg, Peter, *Was ist Informatik? Eine allgemeinverständliche Einführung*, München/ Wien: Hanser, <sup>3</sup>2000.
- Richter, Werner, *Grundlagen der elektronischen Meßtechnik*, Berlin: VEB Verl. Technik, 1985.
- Rosen, Jody, „Researchers Play Tune Recorded Before Edison“, veröffentlicht auf *The New York Times* am 27.03.2008, URL: <https://www.nytimes.com/2008/03/27/arts/27soun.html> (11.11.2019).
- Rubinowicz, A., „Ursprung und Entwicklung der älteren Quantentheorie“, in: *Quantentheorie*, hrsg. v. A. Smekal, Berlin; Heidelberg: Springer, 1933, S. 1–82.
- Salih, Sara, *Judith Butler*, London; New York: Routledge, 2002.
- Schnefeld, Erich J., „Meßprozesse in der Quantenmechanik“, veröffentlicht durch *Spektrum Akademischer Verlag* in *Lexikon der Physik* (1998), URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/messprozesse-in-der-quantenmechanik/9640> (Stand: 19.12.2020).
- Schneider, Martin, „Mikrofone“, in: *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. v. Stefan Weinzierl, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, S. 313–419.



- Schrödinger, Erwin, „The Continuous Transition from Micro- to Macro-Mechanics“ [1926], *Collected Papers on Wave Mechanics*, London; Glasgow: Blackie & Son, 1928, S. 41–4.
- Scott de Martinville, Édouard-Léon „Principes de Phonautographie“ (1857), in: *The Phonautographic Manuscripts of Édouard-Léon Scott de Martinville*, hrsg. und übersetzt von Patrick Feaster, Edition 1.1 (März 2010), URL: <https://www.firstsounds.org/publications/articles/Phonautographic-Manuscripts.pdf> (Stand: 25.10.19), S. 4–12.
- Scott de Martinville, Édouard-Léon „Fixation Graphique de la Voix“ (1878), in: *The Phonautographic Manuscripts of Édouard-Léon Scott de Martinville*, hrsg. und übersetzt von Patrick Feaster, Edition 1.1 (März 2010), URL: <https://www.firstsounds.org/publications/articles/Phonautographic-Manuscripts.pdf> (Stand: 25.10.19), S. 23–42.
- Scott de Martinville, Édouard-Léon „Certificat d'Addition“ (1857;1867;1878), in: *The Phonautographic Manuscripts of Édouard-Léon Scott de Martinville*, hrsg. und übersetzt von Patrick Feaster, Edition 1.1 (März 2010), URL: <https://www.firstsounds.org/publications/articles/Phonautographic-Manuscripts.pdf> (Stand: 25.10.19), S. 52–67.
- Shannon, Claude E., „A Mathematical Theory of Communication“, in: *The Bell System Technical Journal* Vol. 27 (Juli & Oktober), S. 379–423 & S. 623–656, 1948, Nachdruck mit Korrektur veröffentlicht durch das „Department of Mathematics Harvard University“, S. 3–55, URL: <http://math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf> (Stand: 12.01.2021).
- Sheingold, Dan, „Sigma-Delta ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) or Delta-Sigma ( $\Delta$ - $\Sigma$ )? Editor's Notes“, in: *Analog Dialogue* Vol. 24/2 (1990), S. 2.
- Stein, Gertrude zitiert in: Wheeler, John A., „Law Without Law“, in: *Quantum Theory and Measurement*, hrsg. v. John A. Wheeler & Wojciech Hubert Zurek, Princeton, N.J. : Princeton UP, 1983, S. 182–213, hier: S. 185.
- Sterne, Jonathan, *The Audible Past. Cultural origins of sound reproduction*, Durham & London: Duke University Press, 2003.
- Stotz, Dieter, *Computergestützte Audio- und Videotechnik. Multimediatechnik in der Anwendung*, Berlin/ Heidelberg: Springer 2011.
- Strohrmann, Manfred, „Stochastische Signale. Einführung“, veröffentlicht in *Systemtheorie Online* durch die Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Datum unbekannt, URL: <https://www.eit.hs-karlsruhe.de/mesysto/teil-c-stochastische-signale/teil-c-stochastische-signale/einfuehrung.html> (Stand: 24.01.2021).
- Strutt, John W. , *The Theory of Sound*, London: McMillan and Co., 1877.
- Thomas Edison National Historical Park (a), „Origins of Sound Recording: The Inventors. Edouard-Léon Scott de Martinville: The Phonautograph“, in: *National Park Service. U.S. Department of the Interior*, letzte Aktualisierung am 17.07.2017, URL: <https://www.nps.gov/edis/learn/historyculture/origins-of-sound-recording-edouard-leon-scott-de-martinville.htm> (Stand: 22.11.2019).

- Thomas Edison National Historical Park (b), „Replica of Scott's 1857 Flatbed Phonograph“, in: National Park Service. U.S. Department of the Interior, URL: <https://www.nps.gov/media/photo/gallery.htm?pg=5525939&id=F299EC8E-1DD8-B71B-0BA7BBDB92A04247> (Stand: 22.11.2019).
- Trippett, David, *Wagner's Melodies. Aesthetics and Materialism in German Musical Identity*, Cambridge: Cambridge UP, 2013.
- Van Treeck, Jan C., „The Double-Sonic Foundation of Techno-Mathematic Media An untimely entry“, veröffentlicht auf dem Profil des Autors bei *Academia* im November 2018 unter ‚Draft‘, URL: <https://hu-berlin.academia.edu/JanClaasvanTreeck> (Stand: 13.01.2021).
- Völz, Horst, „Informations- und Speichertheorie“, in: *Medientechnisches Wissen. Band 1: Logik, Informationstheorie*, hrsg. von Stefan Höltgen, Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2018, S. 149–282.
- Völz, Horst, *Information und Medienwissenschaft*, Düren: Shaker, 2020.
- Watkinson, John, *The Art of Digital Audio*, Oxford; Boston: Focal Press, 2001.
- Weaver, Warren, „Ein aktueller Beitrag zur mathematischen Theorie der Kommunikation“, in: *Mathematische Grundlagen in Informationstheorie*, hrsg. v. Claude E. Shannon & Warren Weaver, München; Wien: Oldenbourg, 1976, S. 11–39.
- Weinzierl, Stefan, „Grundlagen“, in: *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. v. Stefan Weinzierl, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, S. 1–40.
- Werwein, Martin / Mattias Schick, „Wandler, Prozessoren, Systemarchitektur“, in: *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. v. Stefan Weinzierl, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, S. 885–944.
- Wheeler, John A., „Law Without Law“, in: *Quantum Theory and Measurement*, hrsg. v. John A. Wheeler & Wojciech Hubert Zurek, Princeton, N.J. : Princeton UP, 1983, S. 182–213.
- Whitehead, Alfred N., *An Enquiry Concerning the Principles of Natural Knowledge*, Cambridge: Uni. Press, 1919.
- Whitehead, Alfred N., *The Concept of Nature. The Turner lectures delivered in Trinity College, November 1919*, Cambridge: University Press, 1920.
- Whitehead, Alfred N., *Process and Reality. An Essay in Cosmology* [1929], New York: Free Press, 1978.
- Whitney, William Dwight, *The Century dictionary. An encyclopedic lexicon of the English language. Vol. VI*, New York: The Century Co., 1895.

Wicke, Peter, „Das Sonische in der Musik“, in: *PopScriptum 10 – Das Sonische-Sounds zwischen Akustik und Ästhetik*, 2008, URL: [https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/21050/pst10\\_wicke.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/21050/pst10_wicke.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Stand: 22.02.2021).

Wiener, Norbert, *Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine* [1948], Reinbek b. Hamburg: Rowohlt, <sup>1</sup>1968.

Wiener, Norbert, „Zeit, Kommunikation und das Nervensystem“ [1948], in: *Futurum exactum: ausgewählte Schriften zur Kybernetik und Kommunikationstheorie*, hrsg. v. Bernhard Dotzler, Wien: Springer, 2002, S. 149–82.

Wind, Edgar, *Das Experiment und die Metaphysik*, hrsg. v. Bernhard Buschendorf, eingeleitet v. Brigitte Falkenburg, Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 2001.

Winkler, Hartmut, *Prozessieren. Die dritte, vernachlässigte Medienfunktion*, Paderborn: Universitätsbibliothek, 2016.

Wundt, Wilhelm, *Einführung in die Psychologie*, Leipzig: R. Voigtländers Verlag, 1911.

Young, Thomas, *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts. Volume I*, London: William Savage, 1807.

Zölzer, Udo, „Signalverarbeitung, Filter und Effekte“, in: *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. v. Stefan Weinzierl, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, S. 813–48.

### **Patentschriften**

Cutler, C. C., *Transmission Systems Employing Quantization* (Patent), (Erst-)Anmeldung: 26.04.1954, Patentschrift US2927962A, Veröffentlicht: 08.03.1960.

Oliver, Bernard M. / Claude E. Shannon, *Communication System Employing Pulse Code Modulation* (Patent), (Erst-)Anmeldung: 21.02.1946 US, Patentschrift US2801281, Veröffentlicht: 30.07.1957.

### **Datenblätter**

AD7723, „16-Bit, 1.2 MSPS CMOS, Sigma-Delta ADC“, veröffentlicht durch *Analog Devices* (2005), URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7723.pdf> (Stand: 31.01.2021).

### **Abbildungen**

Abb. 1.: „ $2^4 = 16$  konkrete Ordnungszustände“, © David Friedrich.

Abb. 2.: „Quanteninterferenzbild (Eigenschaft von Welle und Teilchen in einem Bild)“, in: *Quantum Interactive*, Zugehörigkeit: Universität Wien, Markus Arndt *et al.*, URL: [https://interactive.quantumnano.at/wp-content/uploads/2015/05/doubleSlit\\_quantum.png](https://interactive.quantumnano.at/wp-content/uploads/2015/05/doubleSlit_quantum.png) (Stand: 28.02.2021).

- Abb. 3.: „Erwin Schrödingers Darstellung eines oszillierenden Wellenpakets“, in: Schrödinger, Erwin, „The Continuous Transition from Micro- to Macro-Mechanics“ [1926], *Collected Papers on Wave Mechanics*, London; Glasgow: Blackie & Son, 1928, S. 41–4, hier: S. 44.
- Abb. 4.: „Ortsbestimmung eines Teilchens im Sinne John von Neumanns“, in: Neumann, John von, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* [1932], Berlin; Heidelberg, <sup>2</sup>1996, S. 127; Für Beschreibung vgl. ebd. S. 126f.
- Abb. 5.: „Werner Heisenbergs Vorstellung einer Repräsentation von Impuls und Ort“, in: Heisenberg, Werner, „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“, in: *Zeitschrift für Physik* Vol. 43 (1927), S. 172–98, hier: S. 173.
- Abb. 6.: „ΣΔ-ADC erster Ordnung mit Signalrepräsentation nach Integrator und Komparator“, in: Kester, Walt/ James Bryant, „Sigma-Delta Converters“, in: *Data Conversion Handbook. Analog Devices*, Walter Kester (Hg.), Amsterdam; Boston: Elsevier; Newnes, 2005, S. 237.
- Abb. 7.: „Das Quantisierungsrauschen in Abhängigkeit zu Oversampling, Digitalfilter, Noise Shaping und Dezimation“, in: Kester, Walt/ James Bryant, „Sigma-Delta Converters“, in: *Data Conversion Handbook. Analog Devices*, Walter Kester (Hg.), Amsterdam; Boston: Elsevier; Newnes, 2005, S. 236.
- Abb. 8.: „FIR (Blockschaltbild) der Länge  $N$ “, in: Zölzer, Udo, „Signalverarbeitung, Filter und Effekte“, in: *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. v. Stefan Weinzierl, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, S. 824.
- Abb. 9.: „Quantum of Sound“, in: Gabor, D., „Acoustical Quanta and the Theory of Hearing“, in: *Nature* Vol. 159 (1947), S. 591.
- Abb. 10.: „Phonautogramm ‚Fixation et Transcription du Chant (1860)‘“, in: „First Sounds Facsimile Series – No. 5“, veröffentlicht durch *First Sounds* in 2010, hier: S. 8, URL: [http://www.firstsounds.org/publications/facsimiles/FirstSounds\\_Facsimile\\_05.pdf](http://www.firstsounds.org/publications/facsimiles/FirstSounds_Facsimile_05.pdf) (Stand: 19.03.2021).
- Abb. 11.: „Als Bitstream dargestellte Wellenform des sonischen Signals“, in: Stotz, Dieter, *Computergestützte Audio- und Videotechnik. Multimedialechnik in der Anwendung*, Berlin/ Heidelberg: Springer <sup>2</sup>2011, S. 56.